



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Geografía
Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática
Novena Promoción



**ANÁLISIS ESPACIAL DEL NIVEL DE INFESTACIÓN POR MUÉRDAGO ENANO EN EL
BOSQUE DE PINO DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA NEVADO DE
TOLUCA**

TESIS

Para obtener grado académico de
Maestra en Análisis Espacial y Geoinformática

PRESENTA

Martha Cedillo Alonso

Tutor académico:

Dra. Xanatl Antonio Némiga

Tutor adjunto:

Dr. Noel Bonfilio Pineda Jaimes

Tutor adjunto externo:

Dr. Angel Rolando Endara Agramont

Toluca, Estado de México, octubre de 2017.

RESUMEN

Se determinó y analizó el grado de infestación del pino por muérdago enano (*Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum*), en un bosque templado (poblaciones de *Pinus*) del centro de México (Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca). El análisis consideró dos etapas fundamentales: 1) Trabajo de campo: Se realizó una adaptación del muestreo sistemático, en el cual se tomaron en cuenta las curvas de nivel a cada 100 metros, desde la cota 3000 hasta la 4000, sobre cada una se establecieron puntos a cada 200 metros de distancia entre sí, de tal manera que se obtuvieron un total de 1,622 sitios de muestreo. Por cada uno de los sitios se midieron 1000 m², partiendo del punto central (siempre hacia el norte) se trazó una línea con un radio de 17.8 metros (posteriormente hacia los otros puntos cardinales), de tal manera que se obtuvieron los ejes principales sobre los cuales se midieron plántulas, brinzales, latizales y juveniles a un metro de distancia de cada eje, y sobre el área restante se midieron todos los fustales. Se determinó el nivel de infestación por individuo con base en la metodología de Hawksworth. 2) Trabajo de gabinete: Con base en la información recolectada en campo se estableció el nivel de infestación por sitio con las clasificaciones nulo, bajo, medio y alto. Posteriormente se realizó un modelo de distribución potencial tomando en cuenta la información de los sitios recolectados en campo y 27 variables geográficas. Los resultados sugieren que existe más bosque sano que enfermo, sin embargo, el muérdago amarillo y negro se extienden en mayor medida respectivamente, siendo el primero, el que parece ser más agresivo, afectando en mayor medida (por ambas especies) al bosque fragmentado. El nivel de infestación bajo es el que predomina en los sitios muestreados, sin embargo, el nivel de infestación alto es el que hace mayor presencia en las cotas 3500 a 3800. Las variables más influyentes para la presencia del muérdago resultaron: densidad de pino, estacionalidad de la precipitación, distancia a caminos, edafología, exposición de laderas y pendiente.

Palabras clave: Muestreo sistemático, bosque fragmentado.

CONTENIDO

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
JUSTIFICACIÓN	16
CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA NEVADO DE TOLUCA	17
1.1 Ubicación Geográfica.....	17
1.2 Vías de acceso	19
1.3 Condiciones geomorfológicas, edafológicas y geológicas.....	21
1.4 Hidrología.....	23
1.5 Cobertura forestal	25
1.6 Tenencia de la tierra	27
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES	29
2.1 Áreas Naturales Protegidas.....	29
2.1.1 Área de Protección de Flora y Fauna.....	31
2.2 Sistemas de Información Geográfica	32
2.2 Modelos de distribución potencial.....	33
2.2.1 Antecedentes de aplicación de Modelos de distribución potencial en un contexto internacional, nacional y estatal.	34
2.3 Sanidad forestal, plantas parásitas.	35
2.3.1 Antecedentes de plagas y plantas parásitas en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.....	37
OBJETIVO GENERAL	39
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	39
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	40
3.1 Distribución espacial de plantas parásitas en el Nevado de Toluca.	41
3.1.1 Identificación de cobertura forestal de estudio.	42
3.1. 2 Determinación del método de muestreo:	44
3.1.3 Intensidad mínima de muestreo:	48
3.1.4 Distribución espacial del muérdago en el bosque de pino mediante trabajo de campo.....	48
3.2 Análisis de los factores ambientales que influyen, determinan o condicionan la presencia de muérdago mediante modelos estadísticos	55
3.2.1 Creación de una base de datos con información obtenida en campo:	55
3.2.2 Determinación de la nueva superficie de bosque de pino.....	56

3.2.3 Determinación de nivel de infestación por sitio de muestreo:	56
3.2.4 Elaboración de cartografía:	57
3.2.5 Modelo de distribución potencial:.....	59
3.2.6. Validación del modelo, método: Curva ROC, IDRISI SELVA.....	67
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS	70
4.1 Distribución espacial de plantas parásitas en el bosque de pino.	70
4.2 Presencia – ausencia de muérdago.....	72
4.3 Análisis de las superficies infestadas.....	74
4.4 Estructura horizontal del bosque de pino	85
4.5 Análisis altitudinal con relación al muérdago.....	95
4.6 Modelo de distribución potencial	105
4.6.1 Aplicación de correlación de Pearson entre nivel de infestación y variables físico – geográficas mediante SPSS	105
4.6.2 Aplicación de correlación de Pearson entre las variables seleccionadas mediante SPSS	107
4.6.3 Generalidades del modelo de distribución potencial	108
4.6.4 Distribución potencialidad de muérdago en el bosque de pino del APFFNT.....	110
4.6.5 Validación del modelo mediante la curva ROC	112
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
5.1 Conclusiones generales:	113
5.2 Recomendaciones:.....	115
5.2.1 Académicas	115
5.2.2 Prácticas.....	116
APORTACIONES.....	117
BIBLIOGRAFÍA	118

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	18
Mapa 2. Vías de acceso en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	20
Mapa 3. Edafología en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	22
Mapa 4. Hidrología en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	24
Mapa 5. Uso de suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	26
Mapa 6. Tenencia de la tierra en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	28
Mapa 7. Bosque de pino en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	43
Mapa 8. Sitios de muestreo en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	47
Mapa 9. Sitios de muestreo en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	71
Mapa 10. Tipo de muérdago en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	73
Mapa 11. Tipo de muérdago en hectáreas, bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	76
Mapa 12. Fragmentación en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	77
Mapa 13. Regeneración en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	78
Mapa 14. Nivel de infestación en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	82
Mapa 15. Nivel de infestación (ha) en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	83
Mapa 16. Porcentaje de infestación en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	84
Mapa 17. Regeneración en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	93
Mapa 18. Porcentaje de árboles semilleros en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	94
Mapa 19. Modelo de distribución potencial de muérdago en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema metodológico, general.	40
Figura 2. Esquema metodológico, etapa 1.0	41
Figura 3. Método sistemático (Bolford, 2000).....	44
Figura 4. Adaptación del método sistemático, elaboración propia.	45
Figura 5. Diseño de la instalación de sitio de muestreo.....	50
Figura 6. Diseño de la instalación de sitio de muestreo y mediciones a realizar por área.....	51
Figura 7. Formulario de sitio.	51
Figura 8. Formulario por individuo	52
Figura 9. División del árbol en tercios.....	53
Figura 10. Clasificación de infestación.....	54
Figura 11. Esquema metodológico, etapa 2.0.....	55
Figura 12. Estandarización de variables.	60
Figura 13. Requerimientos para la generación del ensamble de modelos en R Studio.	66
Figura 14. Generación de Curva ROC.	68
Figura 15. Determinación de umbral en Curva ROC.	69
Figura 16. Gradiente altitudinal, análisis fitosanitario.	97
Figura 17. Ajuste del modelo, curva ROC.	112

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Intensidad mínima de muestreo, BOLFOR, 2000.	48
Cuadro 2. Materiales para el levantamiento de la información.	49
Cuadro 3. Evaluación de cada tercio según características.	54
Cuadro 4. Clasificación según nivel de infestación.	56
Cuadro 5. Metodología para asignar clasificación al sitio según nivel de infestación.	57
Cuadro 6. Características de las variables seleccionadas para el modelo de distribución potencial.	62
Cuadro 7. Estudios comparativos de modelos. Fuente: Modificado de Van Strien, 2008, en Pliscoff y Fuentes, 2011.	65
Cuadro 8. Extracción en el bosque de pino.	74
Cuadro 9. Condiciones del bosque de pino por densidad.	80
Cuadro 10. Núcleos agrarios afectados por muérdago.	104
Cuadro 11. Variables seleccionadas.	105
Cuadro 12. Variables seleccionadas para correlación con valor de infestación.	106
Cuadro 13. Variables seleccionadas para correlación entre variables.	107
Cuadro 14. Ajuste de los métodos de ensamble del modelo.	109
Cuadro 15. Variables según su nivel de importancia.	110

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Total de sitios con presencias y ausencias de muérdago.	72
Gráfico 2. Total de sitios enfermos por tipo de muérdago y nivel de infestación.	79
Gráfico 3. Estructura horizontal del bosque de pino del APFFNT.	86
Gráfico 4. Estructura horizontal y sanidad del bosque de pino del APFFNT.	87
Gráfico 5. Regeneración sana y enferma en el bosque de pino del APFFNT.	90
Gráfico 6. Estructura y sanidad de regeneración en el bosque de pino del APFFNT.	91

ÍNDICE DE FOTOS

Fotografía 1. Bosque de pino en el Área de Protección de flora y Fauna Nevado de Toluca	25
Fotografía 2. Etapa 2.0, Trabajo de campo.	41
Fotografía 3. Área de estudio: Bosque de pino, Área de Protección de flora y Fauna Nevado de Toluca.	42
Fotografía 4. Gravedad del problema.....	46
Fotografía 5. Muestreo en campo.	52
Fotografía 6. Muérdago enano en el bosque del Nevado de Toluca.	70
Fotografía 7. Niveles de infestación en el bosque de pino del Nevado de Toluca.	81
Fotografía 8. Tipo de muérdago en el bosque de pino del Nevado de Toluca...88	
Fotografía 9. Regeneración con muérdago en el APFFNT.	92

INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas se han convertido en la principal causa de perturbación de los ecosistemas naturales (Vitousek *et al.*, 1997); sin embargo, la destrucción, fragmentación y degradación de los hábitats ha provocado cambios en la estructura del ecosistema y su función (Saunders *et al.*, 1991).

El muérdago enano (*Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum*) afecta numerosas especies de coníferas en todo el mundo (Hawksworth y Weins, 1996; Kolb, 2002). Familias como *Loranthaceae* y *Viscaceae* están ocasionando serios daños en bosques templados de México, Canadá y Estados Unidos. Por otro lado, el muérdago verdadero se encuentra distribuido en la porción central y sur de México, desarrollándose en bosques templados fríos.

En México, los muérdagos enanos están atacando los bosques de alta montaña, que se establecen por encima de los 3500 msnm y están dominados por poblaciones de *Pinus hartwegii* (Endara *et al.*, 2010). Dichos bosques presentan severas infestaciones por muérdagos enanos y en menor proporción por muérdagos verdaderos (*Psitacanthussp*). Ante esta problemática se realizaron estudios del bosque del Nevado de Toluca, (Franco *et al.*, 2010) y (Cedillo, 2012), en los cuales se obtuvieron polígonos de las densidades de las plantas parásitas, así como puntos de presencia de ataques de descortezadores.

El Nevado de Toluca ha sido estudiado, desde una perspectiva ambiental como social. Sin embargo, destaca lo poco que se ha realizado en términos de sanidad del bosque.

Estas problemáticas ambientales se han convertido en el centro de atención de diversos investigadores y científicos, los cuáles realizan diferentes estudios para lograr la conservación y manejo de los recursos naturales, generando el desarrollo de nuevas herramientas tecnológicas con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), las cuales revolucionan día con día.

El estudio se realizó en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, lugar del cual se plasmó una caracterización geográfica con la finalidad de conocer el área de estudio y establecer un contexto general de trabajo.

La presente investigación plantea una metodología para determinar la distribución espacial de muérdago en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, así como su nivel de infestación, en la cual se destaca la importancia de la complementación del trabajo de campo y el uso de los Sistemas de Información Geográfica, para un mejor análisis del territorio.

El bosque de pino se encuentra directamente amenazado por la presencia de muérdago, lo cual se relaciona directamente con la extracción selectiva del recurso forestal, en el presente estudio se realiza un análisis de la distribución espacial del muérdago así como sus niveles de infestación con la finalidad de obtener un diagnóstico en términos de sanidad y poder establecer estrategias específicas de manejo y conservación que permitan la intervención oportuna ante la amenaza de la expansión de dicha planta parásita.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca presenta un deterioro gradual de sus recursos naturales, en especial del forestal, con una tasa de deforestación cercana a las 156 ha/año (Franco *et al.*, 2006), lo que ha desencadenado una fragmentación continua del bosque de pino.

La presencia de plagas, enfermedades y plantas parásitas contribuyen en gran medida a los procesos de extracción selectiva de madera, haciendo del bosque un sistema residual frágil, por lo que los bosques de pino son altamente susceptibles al ataque de diferentes patógenos: principalmente descortezadores (*dendroctonus adjunctus*) y muérdagos enanos (*Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum*), de los cuales se ha demostrado, el incremento del ataque sobre dichas poblaciones.

Estudios anteriores han demostrado la presencia de muérdago en poco más de 11,000 ha en el bosque de pino, lo que corresponde a más del 65%, en donde se presentan zonas con hasta el 100% del arbolado infestado en todas sus edades y tamaños. (Franco y Endara, 2010).

Por lo anterior, es importante determinar el tipo de muérdago, su distribución espacial, así como el nivel de infestación en el bosque de pino del Nevado de Toluca con fines de realizar un análisis de los factores geográficos que intervienen, directa o indirectamente, en la presencia de dichas especies, así como la superficie y la dirección hacia donde se están desplazando.

JUSTIFICACIÓN

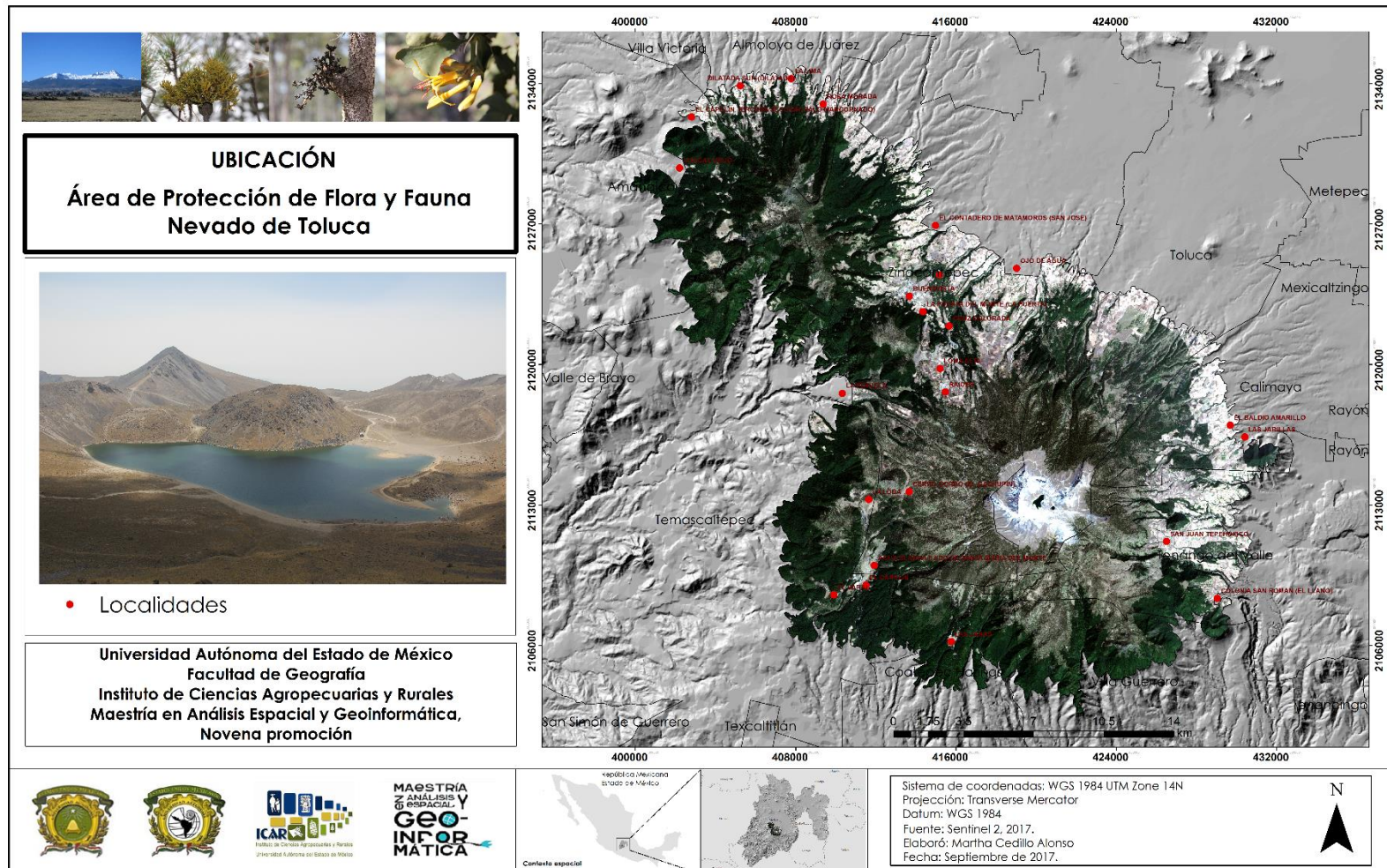
Con base en los antecedentes referidos al deterioro de las poblaciones de pino del Nevado de Toluca, se encontró la importancia de crear una metodología encaminada al manejo y control de muérdago, mediante un diagnóstico en términos fitosanitarios del bosque. Las instituciones gubernamentales, tienen la necesidad de crear estrategias dirigidos a la conservación y manejo de los recursos naturales, especialmente del recurso forestal, por lo que es importante crear una herramienta que no sea dirigida exclusivamente a usuarios expertos en SIG, con miras a la optimización de información y a la aplicación oportuna de planes y programas de manejo del bosque, apoyando así a la toma de decisiones.

CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA NEVADO DE TOLUCA

1.1 Ubicación Geográfica

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), se localiza en el Estado de México, y comprende el volcán denominado Xinantécatl o Nevado de Toluca, el cual ocupa el cuarto lugar entre las cumbres más altas del país con una elevación de 4,680 metros sobre el nivel del mar. Fue establecido mediante Decreto Presidencial expedido el 15 de enero de 1936 y publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de enero de 1936 como Parque Nacional con el objetivo fundamental de destinarla a la conservación perenne de la flora y fauna comarcanas, asimismo, se determinó que su límite inferior seguiría una curva de tres mil metros de altitud sobre el nivel del mar (Mapa 1).

El Decreto que reforma, deroga y adiciona diversas disposiciones del diverso publicado el 25 de enero de 1936, por el que se declaró Parque Nacional la montaña denominada "Nevado de Toluca" que fue modificado por el diverso publicado el 19 de febrero de 1937, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 1o. de octubre de 2013 establece que el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca está conformada por un polígono general con una superficie total de 53,590 ha, dentro del cual se ubica una zona núcleo denominada "Cráter", con una superficie total de 1,941 ha y una zona de amortiguamiento con una superficie de 51,649 ha (CONANP, 2016).

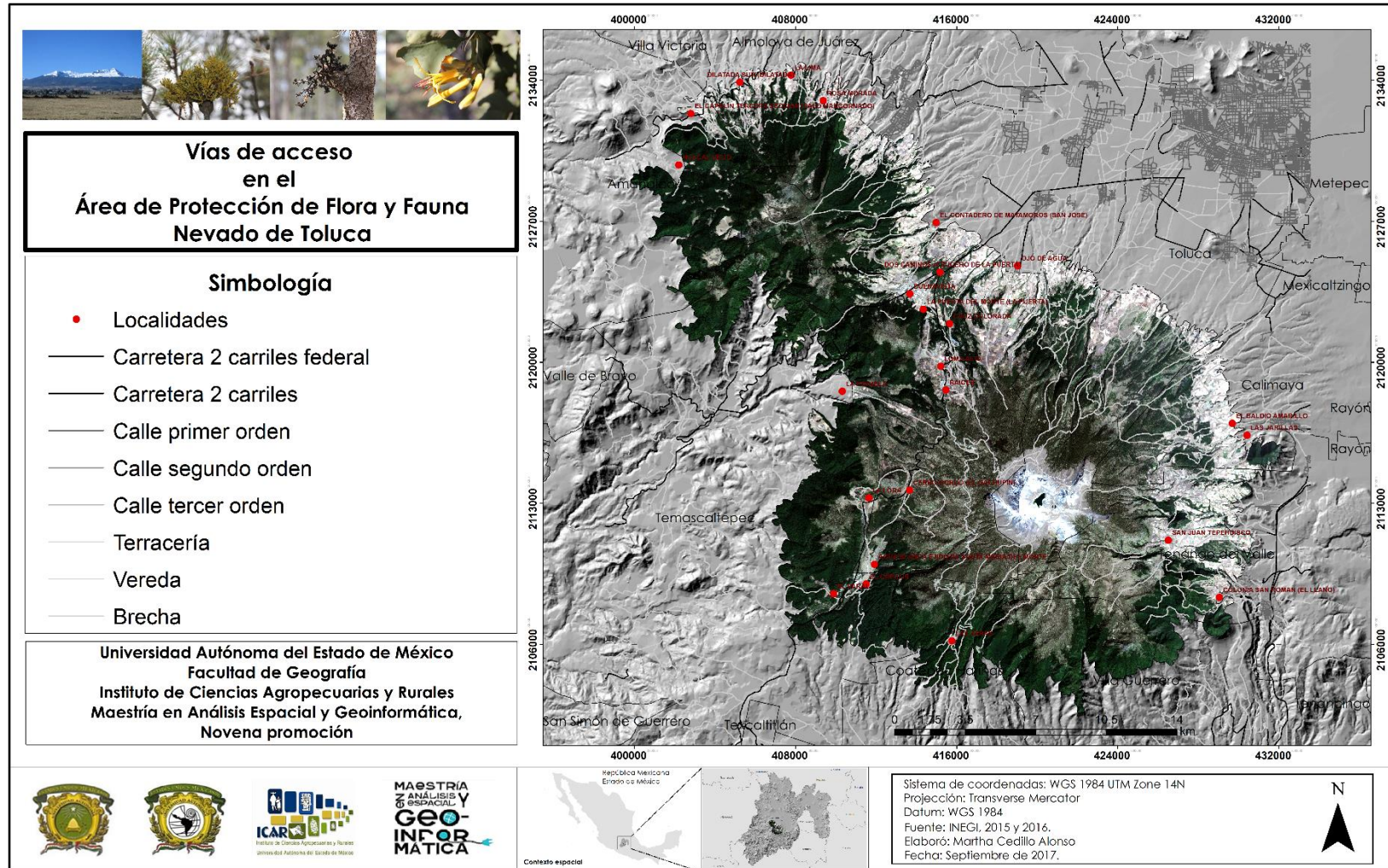


Mapa 1. Ubicación del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

1.2 Vías de acceso

Dentro del APFFNT existe una amplia red de vías de comunicación que van desde carreteras a caminos de terracería. Entre ellas destacan, los tramos correspondientes a las carreteras: Toluca-Temascaltepec; Toluca-Sultepec; Toluca- Amanalco y un sinnúmero de caminos de segundo orden, brechas y veredas que en su mayoría fueron construidos por PROTINBOS, actualmente PROBOSQUE.

En el mapa 2 se observa que la apertura de vías de comunicación en el nevado de Toluca ha originado que se incremente el ecoturismo; sin embargo, también incrementa los impactos hacia la masa forestal, debido a que existen más vías de acceso con fines de extracción de madera. La tala ilegal del bosque trae consigo otros problemas ambientales, tales como: pérdida de biodiversidad, suelos erosionados, desecación del manto freático y pérdida de corrientes superficiales (Castañeda y López, 2009).



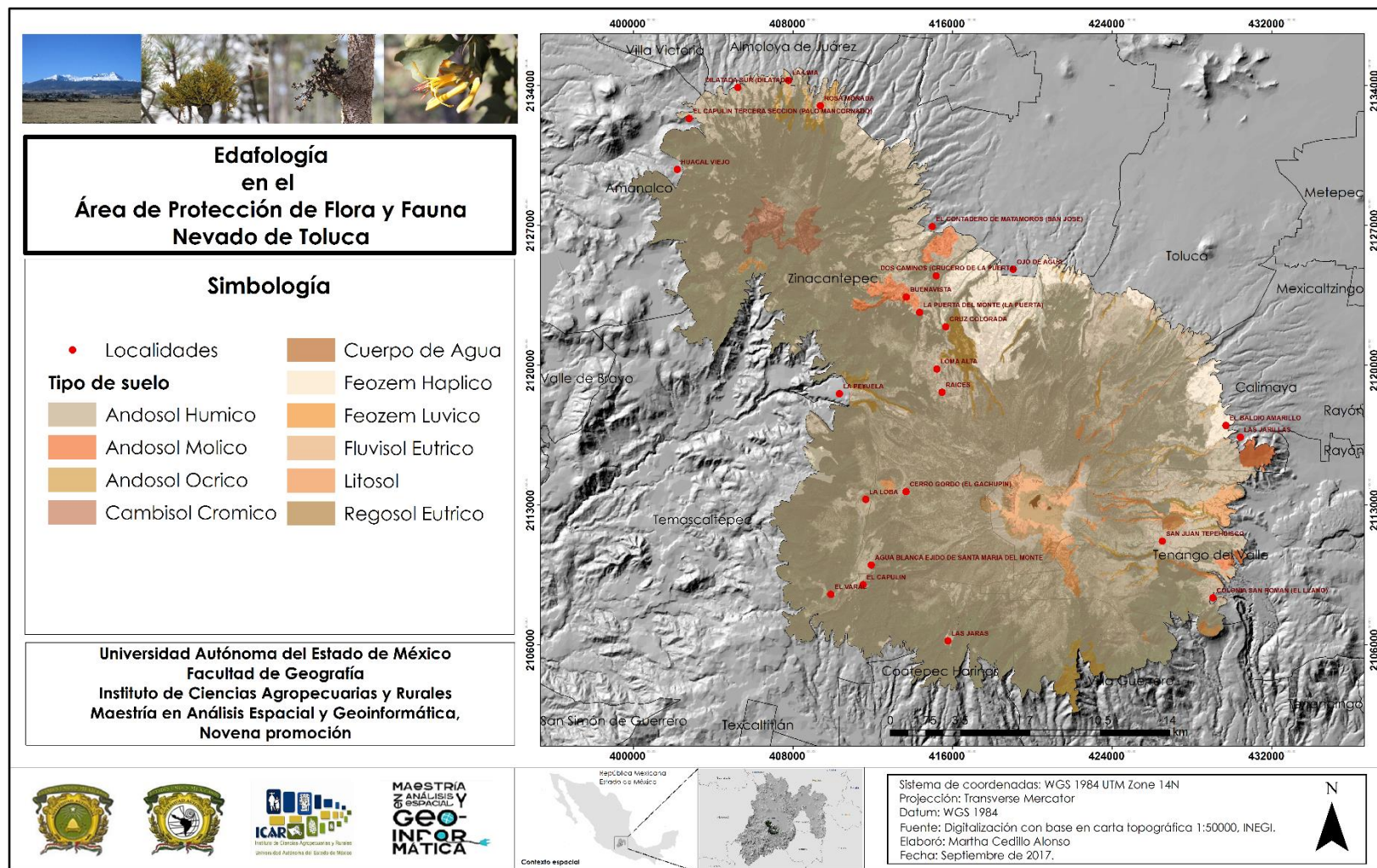
Mapa 2. Vías de acceso en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

1.3 Condiciones geomorfológicas, edafológicas y geológicas

La geomorfología que caracteriza al APFFNT está comprendido, por el domo brechado (ombligo), laderas superiores de lava y tefra y valles glaciares asociados con valles fluviales, dando forma a lo que es el estratovolcán. Sus laderas inferiores son propias de lava y tefra asociadas en su parte norte con pómez y coladas lávicas principalmente cuando se encuentran cercanas a los otros conos volcánicos (Candeau y Franco, 2007). El límite inferior del Nevado (3000 msnm) incluye no solo al volcán Xinantecatl, sino también a las estructuras volcánicas de los cerros San Antonio y El Calvario, hacia el noroeste del estratovolcán. Tomando en cuenta el patrimonio edafológico del APFFNT, es importante mencionar que constituye un proveedor neto de servicios ambientales, tales como la regulación del ciclo hidrológico, la conservación de suelos, la captura de carbono, la aportación de oxígeno a la atmósfera y soporte de actividades turísticas, recreativas y de investigación (Endara, 2010) (Mapa 3). De acuerdo a la formación geológica y geomorfológica, la constitución de los suelos en base a la clasificación de la FAO-UNESCO (1988) es la siguiente:

- *Regosol eutrico*, localizada en la cumbre del volcán, presenta limitaciones para las actividades agropecuarias.
- *Andosol umbrico*, localizada en la mayor parte del volcán con predominio de material conformado por limo, presenta limitaciones para las actividades agropecuarias.
- *Feozem*, localizado en la parte central de la vertiente del Lerma.

Este tipo de suelos son aptos para el uso forestal, sin embargo, debido a su potencial de generar materia orgánica se están aprovechando para uso agrícola, pues es una de las actividades que más reditúan a la población local (Castañeda y López, 2009).

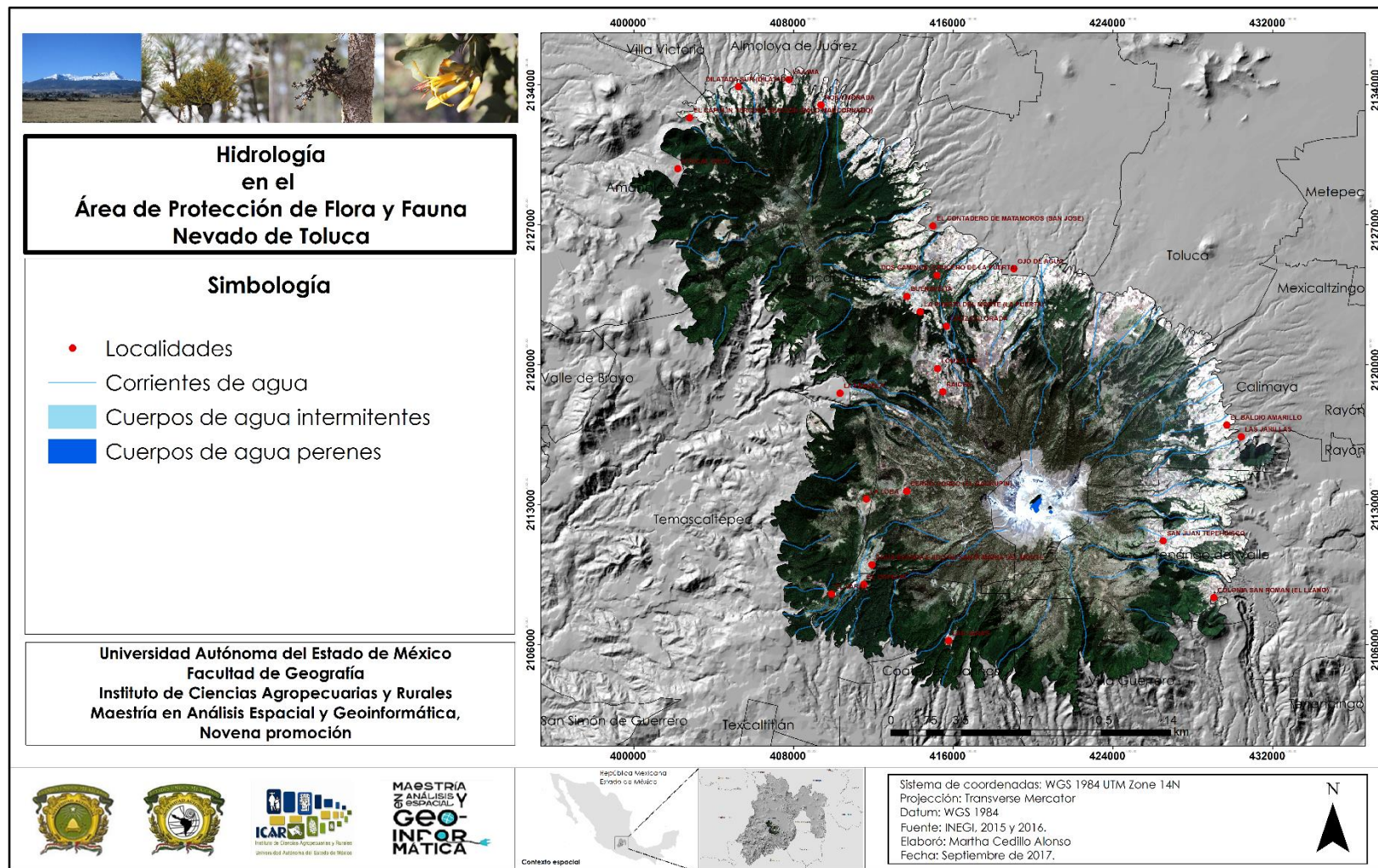


Mapa 3. Edafología en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

1.4 Hidrología

El Nevado de Toluca es origen de dos de las principales cuencas hidrográficas de México, como se observa en el mapa 4, la cuenca del río Lerma-Chapala-Santiago al norte y al oriente, y la del río Balsas al sur y al occidente del APFFNT; cerca de 50 arroyos permanentes descienden en sus cuatro direcciones (CEPANAF, 2007). Cabe mencionar que, por el grado de humedad, su conformación topográfica y la vegetación que se establece a las orillas de cauces y fuentes de agua, las zonas aledañas a los arroyos permiten albergar una biodiversidad más abundante (Candeau y Franco, 2007); sin embargo, los afluentes de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago han sido dañados por el crecimiento urbano y por el desarrollo industrial.

A pesar de ello la mayoría de éstos, son capturados por el Sistema Cutzamala donde se distribuye agua hacia la zona Metropolitana de la Ciudad de México y la zona urbana de la Ciudad de Toluca. Es por ello su importancia pues este Nevado actúa como zona de recarga de los mantos freáticos del Estado.



Mapa 4. Hidrología en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

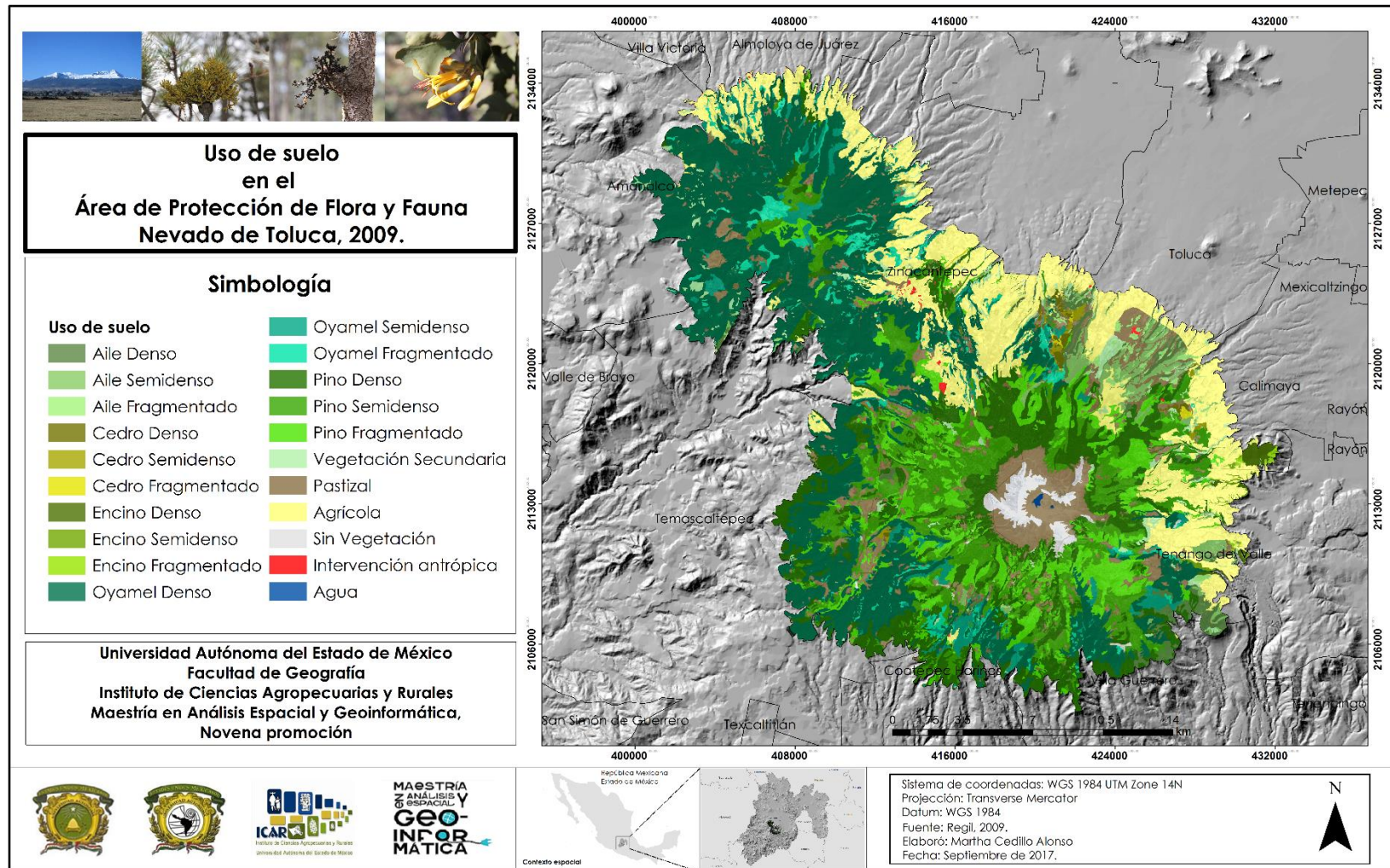
1.5 Cobertura forestal

Los extensos bosques templados en torno al volcán Xinantecatl, constituyen el principal suministro de servicios ambientales del Valle de Toluca. A pesar de su importancia como resguardo del patrimonio natural del Estado de México, sólo 58% de las superficies boscosas puede considerarse como bosques densos, es decir, con un buen estado de conservación. Esto sugiere la pérdida gradual en la densidad de sus poblaciones. Los bosques nativos del APFFNT están siendo amenazados por una tendencia al cambio de uso de suelo y una creciente presión antrópica, lo que repercute en la pérdida de la biodiversidad, en la proliferación de plagas y enfermedades, así como en la afectación de los suelos (Franco *et al.*, 2006) (Fotografía 1).

Los bosques en el ANP suelen manifestarse como asociaciones de diferentes especies arbóreas: pino, pino-encino, pino-aile, pino-oyamel, oyamel, oyamel-pino, oyamel-aile, encino, encino-pino, encino-aile, aile, aile-pino, aile-oyamel y aile-encino, como lo muestra el mapa 5. Estas asociaciones generan condiciones particulares para el desarrollo y establecimiento de arbustos, hongos, musgo y tierra de monte, mismas que en diferentes épocas del año generan importantes fuentes de ingresos adicionales para los pobladores locales.



Fotografía 1. Bosque de pino en el Área de Protección de flora y Fauna Nevado de Toluca. Obtenida en campo.



Mapa 5. Uso de suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

1.6 Tenencia de la tierra

Las localidades ubicadas en el Nevado de Toluca aprovechan los recursos forestales y no forestales, convirtiéndose así en causales del cambio de ocupación del suelo.

Dentro de las variables que determinan el cambio en la ocupación del suelo del parque, están: tipo de tenencia de la propiedad, relaciones sociales en la localidad y con otras localidades, tipo de recurso que se extrae y su destino.

De las localidades del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, se ha identificado que el tipo de propiedad predominante es el ejido y son estos los que están aprovechando los recursos forestales y no forestales (mapa 6). A pesar de ello identificamos que la pequeña propiedad se está incrementando. Los ejidatarios al ver que sus tierras dejan de ser productivas se ven en la necesidad de vender sus tierras ejidales a personas ajenas a su comunidad, las cuales sólo compran las tierras para esparcimiento (Castañeda y López, 2009).

28

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

2.1 Áreas Naturales Protegidas.

De acuerdo con la CONANP (2016) las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas.

Las ANP prestan numerosos servicios ambientales: belleza escénica, captación, suministro y saneamiento de agua, control de la sedimentación y erosión, protección de cuencas hidrológicas, regulan el clima, dan continuidad a procesos evolutivos manteniendo la biodiversidad, funcionan como hábitat de especies de flora y fauna, fomentan el ecoturismo y la recreación y proveen recursos y materias primas (IMAC, 2005).

En México, el término Áreas Naturales Protegidas se muestra como el instrumento de política ambiental con mayor definición jurídica para la conservación de la biodiversidad. Se crean mediante un decreto presidencial y las actividades que pueden llevarse a cabo en ellas se establecen de acuerdo al Reglamento, el programa de manejo y los programas de ordenamiento ecológico de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). Están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo, según categorías establecidas en la Ley (CONANP, 2016).

Una característica importante de las ANP en México, es la presencia de habitantes, los cuales están identificados como propietarios individuales, ejidatarios o comunales, lo que ocasiona graves problemas de pobreza y marginación. Se podría afirmar que más del 80% de la riqueza biológica a

nivel nacional se encuentra bajo el sistema de propiedad privada (PRONATURA, 2003).

En estos espacios naturales en los que se realiza investigación científica, etnomedicina, y ecoturismo convergen diferentes actores, programas sectoriales, presupuestos, además de un mosaico de formas de tenencia de la tierra como ejidos, comunidades, pequeña propiedad, títulos coloniales, propiedad federal y estatal (CONANP, 2016).

En México, las ANP no son consideradas como islas de conservación separadas del contexto social y económico en el que están situadas, sino que forman parte de estrategias regionales y de ordenamiento del territorio. Las ANP se rigen por Programas de Conservación y Manejo, como instrumentos de planeación para la ejecución de actividades de conservación, mismos que permiten conjuntar esfuerzos públicos y privados para la consecución de estos objetivos (Bezaury, 2004). Los programas giran alrededor de acciones directas (protección, manejo y restauración) e indirectas (conocimiento, cultura y gestión).

De acuerdo con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), las áreas naturales protegidas tienen como propósito:

- a) Preservar los ambientes naturales representativos de las diferentes regiones biogeográfico-ecológicas y de los ecosistemas más frágiles para asegurar el equilibrio y la continuidad de los procesos evolutivos y ecológicos
- b) Salvaguardar la diversidad genética de las especies silvestres de las que depende la continuidad evolutiva, particularmente las endémicas, amenazadas o en peligro de extinción
- c) Asegurar el aprovechamiento racional de los ecosistemas y sus elementos.

- d) Proporcionar un campo propicio para la investigación científica y el estudio de los ecosistemas y su equilibrio
- e) Generar conocimientos y tecnologías que permitan el aprovechamiento racional y sostenido de los recursos naturales del país, así como su preservación
- f) Proteger poblados, vías de comunicación, instalaciones industriales y aprovechamientos agrícolas, mediante zonas forestales en montañas donde se originen torrentes, así como las demás áreas que tiendan a la protección de elementos circundantes con los que se relacione ecológicamente el área
- g) Proteger los entornos naturales de zonas de monumentos y vestigios arqueológicos, históricos y artísticos para la cultura e identidad nacional

2.1.1 Área de Protección de Flora y Fauna.

Las áreas de protección de la flora y la fauna se constituirán de conformidad con las disposiciones de la LGEEPA, de la Ley General de Vida Silvestre, la Ley de Pesca y demás aplicables, en los lugares que contienen los hábitats de cuyo equilibrio y preservación dependen la existencia, transformación y desarrollo de las especies de flora y fauna silvestres.

En dichas áreas podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la preservación, repoblación, propagación, aclimatación, refugio, investigación y aprovechamiento sustentable de las especies mencionadas, así como las relativas a educación y difusión en la materia.

Asimismo, podrá autorizarse el aprovechamiento de los recursos naturales a las comunidades que ahí habiten en el momento de la expedición de la declaratoria respectiva, o que resulte posible según los estudios que se realicen, el que deberá sujetarse a las normas oficiales (LGEEPA, 2012).

2.1.1.1 Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

El Nevado de Toluca es una de las Áreas Naturales Protegidas con más antigüedad en nuestro territorio mexicano, decretado inicialmente como Parque Nacional el 25 de enero de 1936, y modificado por decreto del presidente Lázaro Cárdenas el 19 de febrero de 1937 para establecer una reserva forestal nacional dentro del parque. El 1 de octubre de 2013, fue dotada con la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna por decreto presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación (CONANP, 2016).

De acuerdo con Franco (2009), el volcán Nevado de Toluca o Xinantécatl es la cuarta montaña más alta del país, con sus 4,680 metros de altitud sobre el nivel del mar y constituye diversos ecosistemas que requieren ser preservados y restaurados, debido a la variedad e intensidad de las actividades humanas que se registran actualmente en su territorio (CONANP, 2016).

2.2 Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un conjunto de herramientas diseñado para la adquisición, almacenamiento, análisis y representación de datos espaciales (Ordóñez, 2003).

Según Bocco (1998), los datos geográficos son descriptores de objetos en tres dimensiones: localización (absoluta y relativa), atributos (variables explicativas) y tiempo.

Los SIG trabajan con mapas y pueden realizar operaciones de análisis espacial, las cuales están constituidas por una serie de técnicas estadísticas y matemáticas aplicadas al estudio de datos georreferenciados y sus atributos almacenados en el propio sistema, posibilitando trabajar con las

relaciones espaciales de las entidades contenidas en cada capa temática de la base de datos, permitiendo obtener nuevos mapas a partir de una única fuente de datos (Buzai y Baxendale, 2006).

En función del modelo de datos implementado en cada sistema, se pueden distinguir dos grandes grupos de Sistemas de Información Geográfica: Vectoriales y Raster.

2.2 Modelos de distribución potencial

En los últimos años se ha generalizado una nueva herramienta que permite analizar objetivamente los patrones espaciales de presencia de organismos: los modelos de distribución de especies (MDE) (Mateo *et al.*, 2011).

Un MDE, es una construcción numérica que define en el espacio ecológico las relaciones que existen entre la presencia de una especie y los valores de variables ambientales con influencia en su distribución (Pando, 2009)

Estos modelos se basan en procedimientos estadísticos y cartográficos que partiendo de datos reales de presencia permiten inferir zonas potencialmente idóneas en función de sus características ambientales.

Los modelos han evolucionado desde su aplicación a especies aisladas hasta análisis de cientos o miles de taxones para combinarlos en el análisis de la biodiversidad y riqueza específica (Mateo *et al.*, 2011).

Los modelos de nichos ecológicos son importantes para una variedad de aplicaciones en ecología y conservación (Graham *et al.*, 2004). Por ejemplo, intentan proveer de cartografía detallada de distribución relacionada con la dispersión de especies invasoras (Thuiller *et al.* 2005), impactos en el cambio climático (Thomas *et al.* 2004) y patrones espaciales de diversidad de especies (Graham *et al.*, 2006).

2.2.1 Antecedentes de aplicación de Modelos de distribución potencial en un contexto internacional, nacional y estatal.

En 2011 se realizó una evaluación de la distribución potencial actual en Colombia del cedro (*cedrela odorata*) y el cocobolo (*dalbergia retusa*), especies incluidas en apéndices cites y recomendaciones para el manejo in situ de sus poblaciones, las variables que se utilizaron fueron la 19 variables de BIOCLIM (Temperatura y precipitación) (Cárdenas *et al.*, 2011)

En 2012, se elaboró un modelo de distribución potencial de *Pinus martinezii* en la cuenca del lago de Cuitzeo en Michoacán, México, utilizando información ambiental y datos de presencia de la especie, lo que requirió identificar los factores ambientales que determinan la distribución de *P. martinezii*, y elaborar un perfil bioclimático de la especie. El modelo se apoyó en un análisis multicriterio dentro de un sistema de información geográfica. Los criterios utilizados en el análisis fueron organizados en 3 grandes grupos: geopedológico (roca, relieve, suelos), morfométrico (altitud, pendientes y exposición de la ladera) y climáticos (temperatura media anual y precipitación anual) (Leal *et al.*, 2012)

En 2014 se determinó la distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California (*Atriplex semibaccata*, *Brassica tournefortii*, *Bromus rubens*, *Centaurea melitensis*, *Cynodon dactylon*, *Salsola tragus*, *Schismus barbatus* y *Tamarix ramosissima*), mediante el uso del programa de modelaje MaxEnt, utilizando las 19 variables bioclimáticas de WorClim (Palma *et al.*, 2014).

En 2012 Cedillo realizó un modelo de distribución potencial de muérdago en el bosque de pino del Nevado de Toluca mediante MaxEnt tomando en cuenta 7 variables físico geográficas y datos recolectados directamente de campo (Cedillo, 2012).

2.3 Sanidad forestal, plantas parásitas.

En los bosques templados, las plantas parásitas, que incluyen al grupo de los muérdagos, se han convertido rápidamente en una de las principales causas para disminución de la producción de madera, reduciendo el crecimiento, rendimiento y calidad de la misma (Hawksworth, 1983).

La superficie boscosa del Estado de México es de 740 mil ha conformadas por coníferas y latifoliadas, las cuales pueden dividirse en diferentes escenarios forestales: bosques naturales, bosques con y sin manejo, bosques dentro de ANP y plantaciones. Cada uno de ellos presenta una problemática fitosanitaria distinta, debida a diversos factores, tales como, económicos, ecológicos y sociales. Esta superficie constantemente se ve afectada por factores bióticos y abióticos: de las cuales destacan los bióticos con los siguientes grupos de plagas: insectos, descortezadores, defoliadores, barrenadores de yemas y brotes, barrenadores de conos y semillas y chupadores de savia, así como los grupos de enfermedades que afectan raíz, tallo y hojas, con especial atención a las plantas parásitas, (muérdago enano representada por dos especies: *Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum*, muérdago verdadero (*Psittacanthus sp*)), que aunado con los descortezadores y defoliadores, anualmente causan la pérdida de la cubierta forestal en un promedio de 500 ha, principalmente en ANP y con litigio (sin manejo) (Franco et al, 2010).

El ataque de plagas, enfermedades y plantas parásitas en el PNNT afecta principalmente a los bosques de pino y oyamel. Las plagas y parásitos que afectan a los pinos del APFFNT, tienen distintos ciclos biológicos y formas de propagación. Entre los más dañinos se encuentran el muérdago enano representada por dos especies: *Arceuthobium globosum* y *A. vaginatum*, muérdago verdadero (*Psittacanthus sp*), de los cuales se han registrado

algunas especies, pero no se tienen muchos datos, ni información acertada en relación a su manejo y erradicación (Franco *et al*, 2010).

A continuación, se desglosan algunos conceptos importantes para el entendimiento de esta problemática:

Plaga: Cualquier especie, raza, biotipo vegetal o animal o agente patógeno dañino que ponga en riesgo los recursos forestales, el medio ambiente, los ecosistemas, o sus componentes (SEMARNAT, 2006).

Descortezadores: Insectos que se alimentan del floema y cámbium que se encuentra debajo de la corteza del árbol y algunas especies también colonizan la madera. Como consecuencia de su ataque pueden causar la muerte de éste (SEMARNAT, 2006).

Plantas parásitas: Denominadas también "matapalos" o "muérdagos", pertenecen a la familia *Loranthaceae*. Si bien es cierto que ellas pueden fotosintetizar y producir carbohidratos a partir de la clorofila de sus tallos y hojas, también toman minerales y agua de los árboles sobre los que se instalan. En vez de raíces tienen haustorios, que son unas estructuras parecidas a esas, que penetran la corteza de las ramas y el fuste, para dirigirse a los tejidos conductores y absorber nutrientes y agua.

Los efectos de las plantas parásitas son múltiples. Por un lado, estimulan la producción de yemas adventicias, las que dan origen a los crecimientos conocidos como "escobas de bruja", que reducen el crecimiento y el vigor del árbol, haciéndolo propenso al ataque de patógenos e insectos. Por otra parte, en los puntos en que se implanta el matapalo, se presentan deformaciones o abultamientos y la madera se vuelve esponjosa y normalmente veteada, por lo que no pueden aprovecharse; con frecuencia, los árboles sufren quebraduras en estos puntos. En plántulas y

arbolitos e incluso en árboles adultos, pueden provocar la muerte (CATIE, 1991).

Manejo de plagas: Acciones que permiten mantener poblaciones de insectos descortezadores a niveles económica, social y ecológicamente aceptables. Dichas acciones pueden ser emergentes o incorporarse en un programa de manejo de recursos forestales. Son económicamente eficientes y ecológicamente aceptables. Consideran la prevención, evaluación y la utilización en forma armónica de diferentes herramientas de control y el seguimiento correspondiente (SEMARNAT, 2006).

2.3.1 Antecedentes de plagas y plantas parásitas en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

En 2006, Ramírez y González determinaron la distribución espacial del muérdago enano, parásito de coníferas, en la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca. Dicha distribución se estableció tanto por métodos de Estadística No Espacial, como de Estadística Espacial (Geoestadística y Análisis Espacial por Índices de Distancia, SADIE por sus siglas en inglés). Los resultados demostraron que las poblaciones de muérdago enano presentaron una distribución agregada, dispersándose en varios centros de agregación. Se elaboraron mapas de densidad del muérdago enano mediante la técnica del Krigeado, mismos que corroboraron el tipo de distribución mencionado. Se halló que la infestación de este parásito de coníferas no alcanzó 100% de las parcelas de estudio, situación interesante para establecer medidas de control enfocadas a las zonas de real infestación. No se logró determinar una estabilidad espacial y temporal de las poblaciones del parásito.

Ramírez y Porcayo en 2010, realizaron la aplicación de métodos geoestadísticos para conocer la distribución espacial de muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca. Los resultados mostraron que el muérdago tiene una distribución agregada, con varios centros de agregación. Elaboraron mapas de densidad de la plaga mediante la técnica del krigeado, encontrando que la infestación no alcanzó la totalidad de las parcelas estudiadas, sin embargo ha aumentado considerablemente.

En 2010 se realizó un estudio fitosanitario del bosque del Nevado de Toluca (Franco y Endara, 2010), en el que se obtuvieron polígonos de las superficies infestadas por muérdago, bajo la metodología de transectos en campo. El estudio señala que el muérdago enano infesta 3410 ha y el muérdago verdadero 95, dichas superficies se representaron cartográficamente.

En 2012, Cedillo determinó 6,003 ha infestadas por muérdago enano, 70 ha por muérdago verdadero, así como la identificación de 41 puntos con presencia de descortezador, tomando como referencia la metodología utilizada en el estudio fitosanitario.

En 2014, la CONAFOR, a través de la UAEM, realizó un manual sobre la actualización de plagas y enfermedades en los bosques del nevado de Toluca. En dicho manual se plantean para el bosque de pino 9,308 ha infestadas por muérdago enano, 55 ha por muérdago verdadero, así como 106 puntos de presencia de descortezador. Para el bosque de oyamel se encontraron 1,539 ha infestadas por muérdago enano y para el bosque de aile 541 ha infestadas por muérdago verdadero. Para este estudio se utilizó la metodología de transectos.

OBJETIVO GENERAL

Analizar el nivel de infestación del bosque de pino por muérdago enano con variables geográficas en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el estado fitosanitario de los bosques de pino del APFFNT.
- Analizar las condiciones geográficas del muérdago en el APFFNT.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La metodología contempla dos etapas generales, la primera tiene como objetivo principal determinar el grado de infestación por muérdago en el bosque de pino del Nevado de Toluca mediante trabajo de campo. La segunda consiste en realizar un modelo de distribución potencial con base en variables geográficas, por medio de las cuales podamos inferir acerca de las variables que influyen, determinan o condicionan la presencia de dicha planta parásita, en mayor o menor medida.

En la figura 1, se muestra el esquema general correspondiente a la metodología de la investigación.

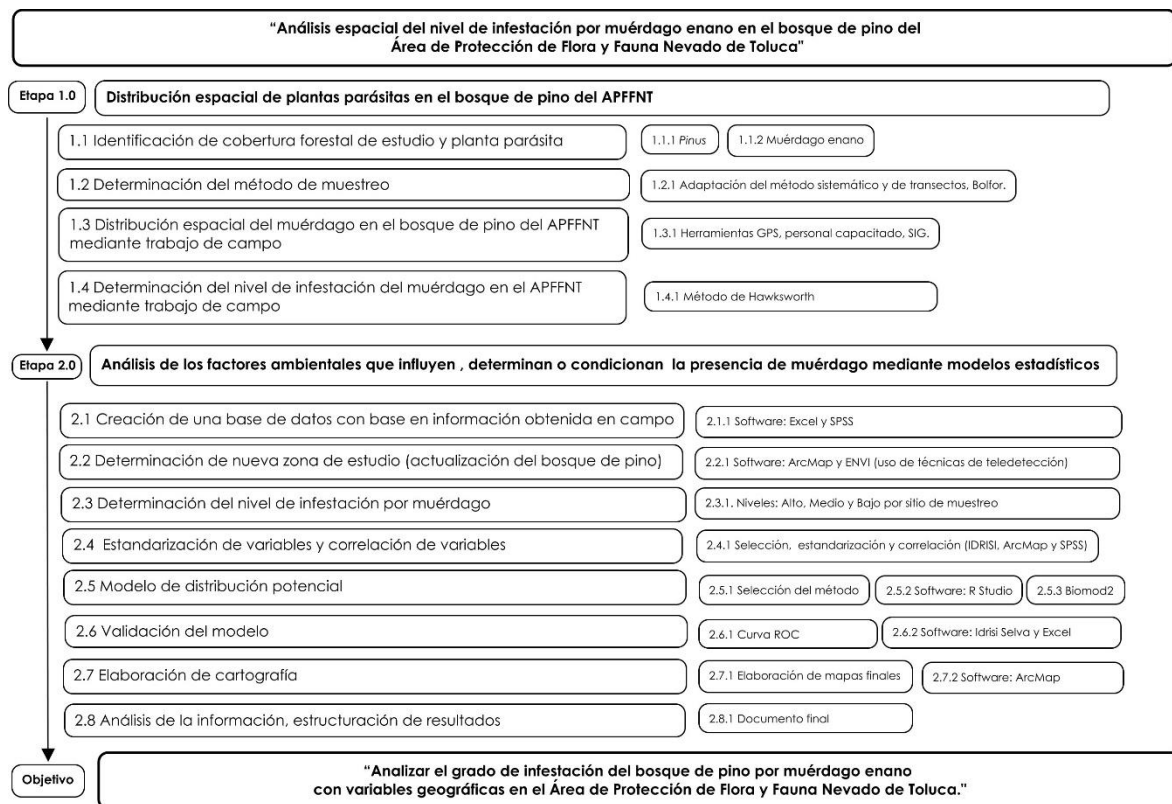


Figura 1. Esquema metodológico, general. Elaboración propia.

3.1 Distribución espacial de plantas parásitas en el Nevado de Toluca.



Fotografía 2. Etapa 2.0, Trabajo de campo. Obtenida en campo

La figura 2 muestra la primera etapa del proceso metodológico:

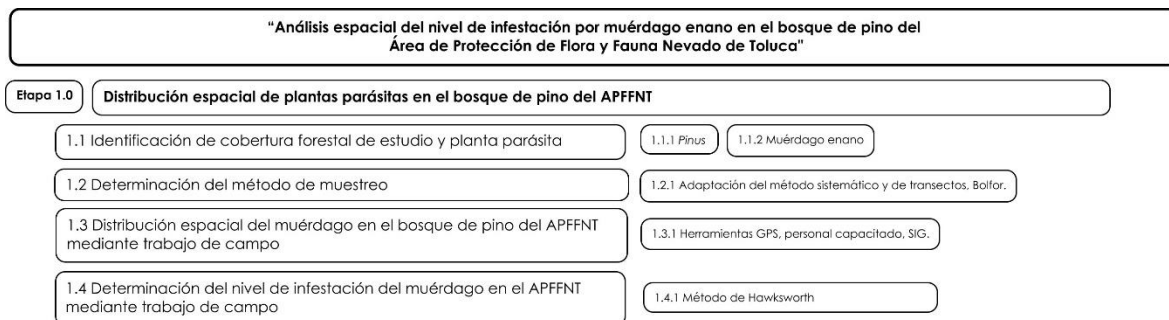


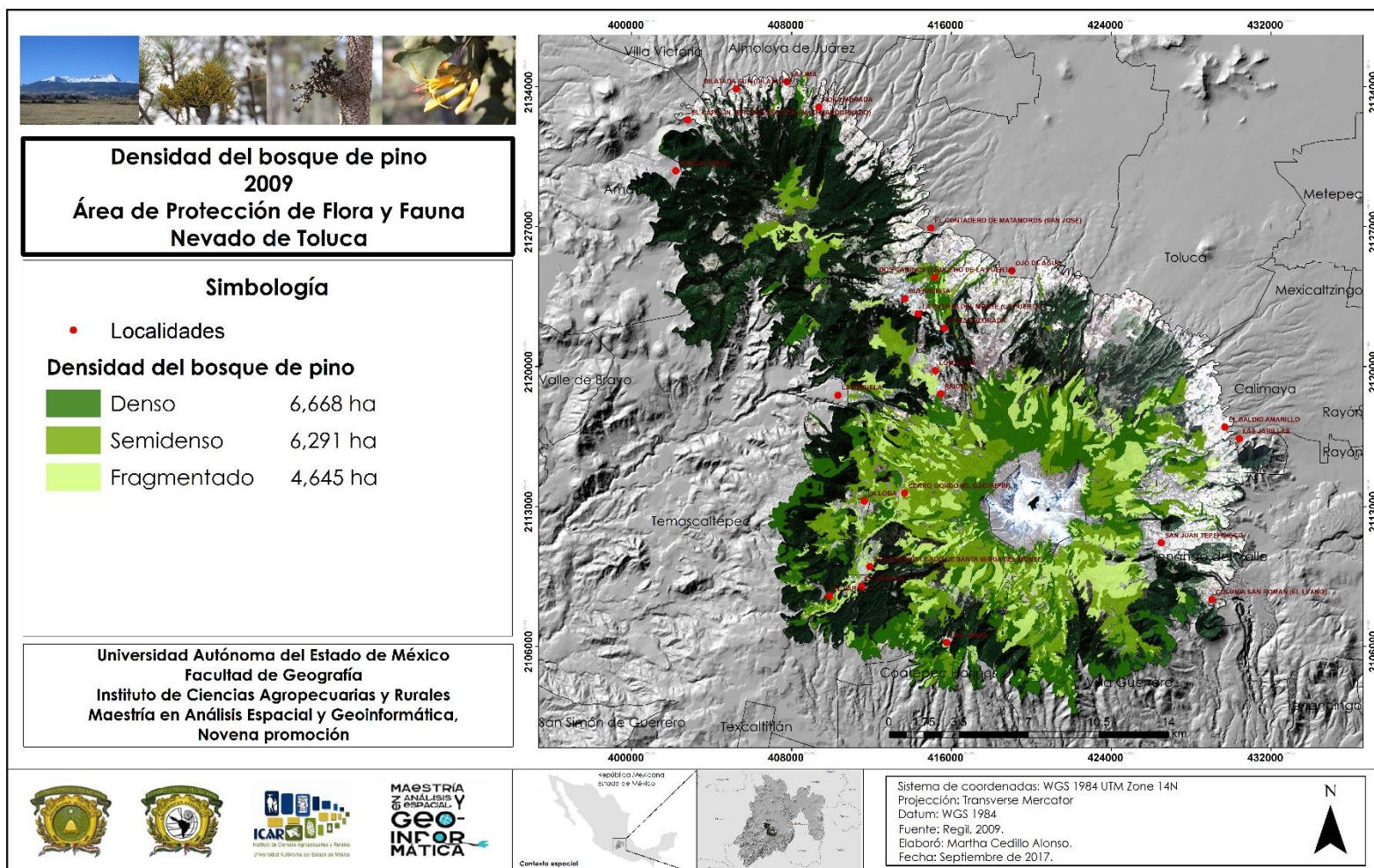
Figura 2. Esquema metodológico, etapa 1.0. Elaboración propia.

3.1.1 Identificación de cobertura forestal de estudio.

Con base en estudios previos se determinó la necesidad de conocer el nivel de infestación por muérdago en el bosque de pino (Fotografía 3), ya que sólo se conocía la superficie enferma y no el nivel de infestación. El mapa 7 muestra la distribución espacial del bosque de pino por densidad (Regil, 2009) mismo que se tomó como base para la realización del presente estudio. Cabe mencionar que una vez teniendo el muestreo correspondiente se actualizó el área de estudio (bosque de pino) sobre la cual se trabajó el resto de los procesos.



Fotografía 3. Área de estudio: Bosque de pino, Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Obtenida en campo



Mapa 7. Bosque de pino en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

3.1. 2 Determinación del método de muestreo:

Se realizó trabajo de campo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, con la finalidad de saber en qué medida está siendo afectado el bosque de pino por muérdago, y con base en ello establecer un método para el levantamiento de la información. Tomando en cuenta que la distribución del muérdago y sus niveles de infestación se presentan de manera aleatoria, se realizó una adaptación del método sistemático, el cual consiste en ubicar las muestras o Unidades Muestrales (UM) en un patrón regular en toda la zona de estudio (Figura 3). Este tipo de muestreo permite detectar variaciones espaciales en la comunidad. Sin embargo, no se puede tener una estimación exacta de la precisión de la media de la variable considerada. El muestreo sistemático puede realizarse a partir de un punto determinado al azar, del cual se establece una cierta medida para medir los subsiguientes puntos (BOLFOR, 2000).

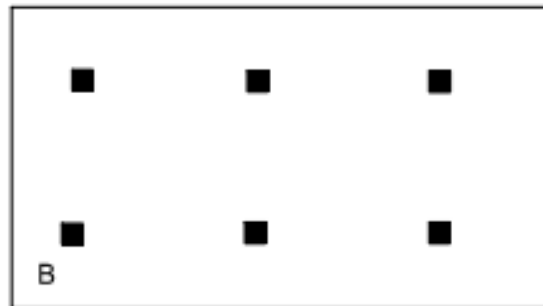


Figura 3. Método sistemático (BOLFOR, 2000).

En este caso se tomaron en cuenta las curvas de nivel desde la cota 3000 msnm hasta la 4000 msnm a cada 100 m de distancia una con respecto de la otra, debido a la variabilidad climática asociada a la altitud (Mayer y Ott, 1991), de tal manera que se obtuvieron 11 curvas sobre las cuales se establecieron las UM a cada 200m, dichas UM son circulares de 0.1 ha (17.86m de radio) (Figura 4).

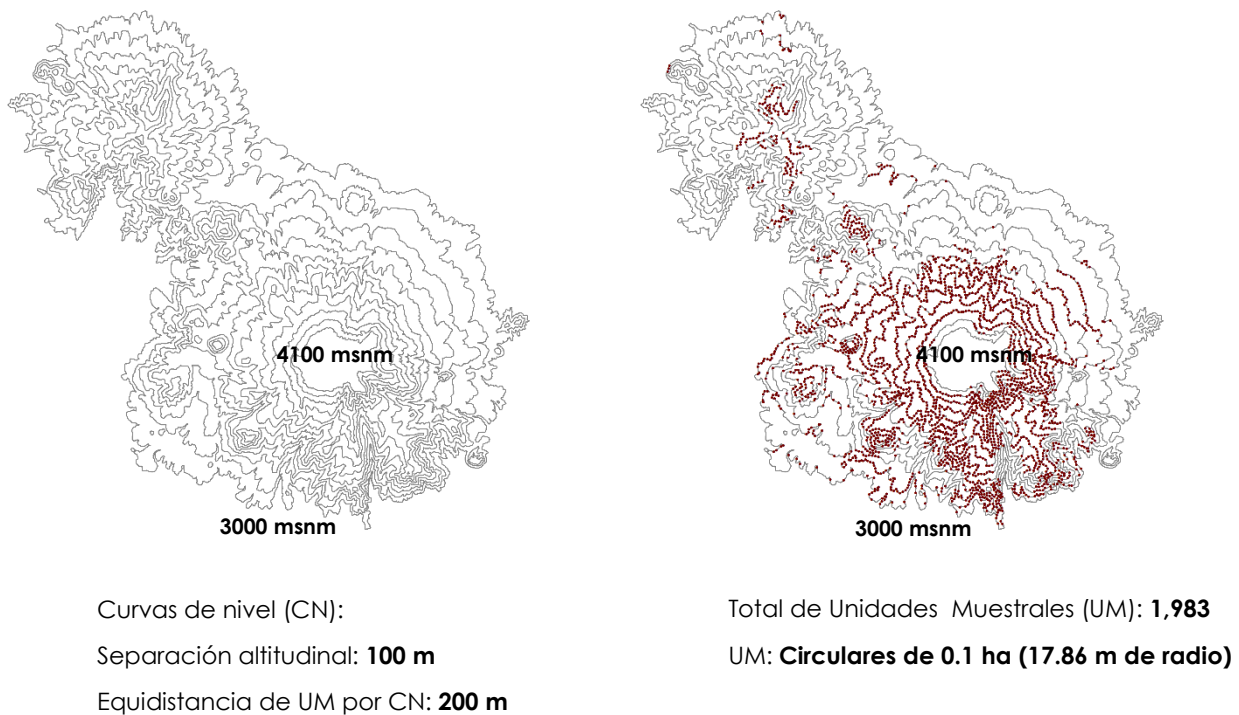


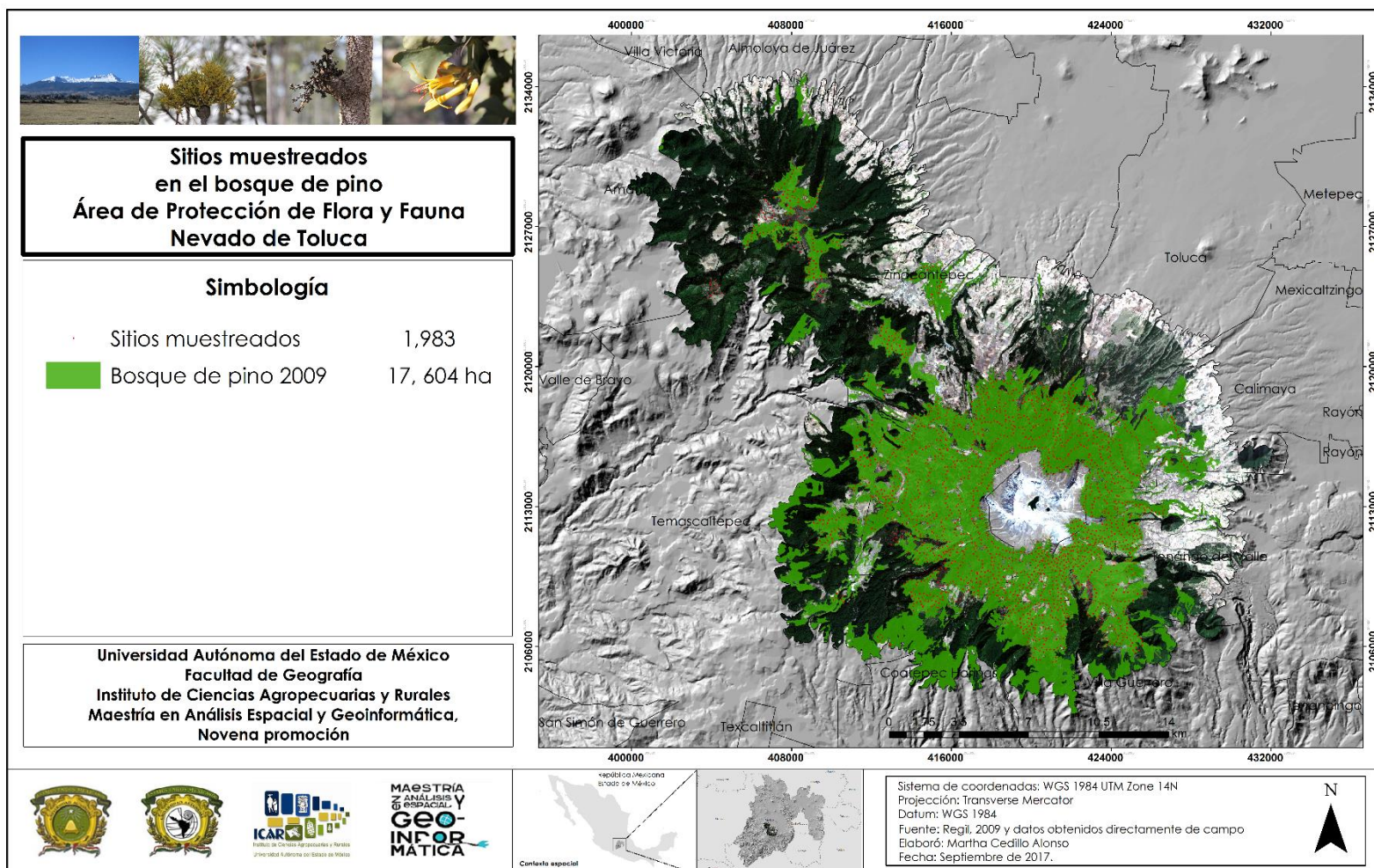
Figura 4. Adaptación del método sistemático. Elaboración propia.

Una vez aplicado el método antes mencionado se obtuvo la distribución y el total de los sitios de muestreo, posteriormente se realizó un corte de dichos puntos a partir de la superficie de pino planteada por Regil en 2009, ya que el bosque de pino es el objetivo de ésta investigación. De tal manera que se

obtuvieron 1,983 sitios. Con base en los antecedentes sobre el estado fitosanitario del bosque (Fotografía 4), y a la observación en campo se pudo concluir que el sesgo en los datos recolectados puede tener variaciones trascendentes y contribuir de manera directa en los resultados, por lo que se optó por realizar el levantamiento total de la información de los sitios de muestreo planteados y así obtener mayor especificidad en los resultados (Mapa 8).



Fotografía 4. Gravedad del problema. Obtenida en campo.



Mapa 8. Sitios de muestreo en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

3.1.3 Intensidad mínima de muestreo:

El muestreo requiere una intensidad mínima dependiendo el número de superficie total que se quiere representar. El siguiente cuadro (BOLFOR, 2000) plantea las intensidades mínimas de muestreo por superficie total.

Cuadro 3. Intensidades mínimas y tamaño de las unidades de muestreo para parcelas fijas y para el muestreo goniométrico de Bitterlich

Superficie total de los estratos forestales (ha)	Intensidad mínima (%)	Tamaño de las unidades de muestreo en el caso de parcelas fijas (ha)	No. de parcelas variables por conglomerado en el caso del muestreo goniométrico (FB=4)
100	8.0	0.08	1
500	2.0	0.1	1
1.000	1.5	0.15	2
2.000	1.2	0.25	3
5.000	0.8	0.4	4
10.000	0.5	0.5	5
15.000	0.35	0.5	5
20.000	0.28	0.55	6
25.000	0.24	0.6	6
30.000	0.22	0.65	7
50.000	0.2	1.0	10
100.000	0.15	1.5	15
200.000	0.1	2.0	20

Cuadro 1. Intensidad mínima de muestreo, BOLFOR, 2000.

Se determinó la intensidad de muestreo de 1,622 sitios (bosque de pino), con base en el cuadro antes mencionado para lo cual se dividió la superficie correspondiente a los sitios de muestreo en hectáreas (162.2 ha) entre el total de la superficie a representar, en este caso bosque de pino (12, 924 ha) y se multiplicó por cien obteniendo un resultado de 1.25% (recomendado 0.42%), dato que hace referencia a la intensidad de muestreo de este estudio en porcentaje (cuadro 1), superando considerablemente la intensidad mínima de muestreo planteada.

3.1.4 Distribución espacial del muérdago en el bosque de pino mediante trabajo de campo.

El estudio implicó la realización de un muestreo intensivo en campo con la finalidad de identificar el estado fitosanitario del bosque de pino.

3.1.4.1 Materiales:

El cuadro 2 muestra los materiales requeridos para la realización del trabajo de campo:

Trabajo previo en gabinete	Trabajo en campo
-Personal capacitado en Sistemas de Información Geográfica, así como conocimiento de la temática en general	-Personal capacitado en Sistemas de Información Geográfica, así como conocimiento de la temática en general
-Hardware	-Camioneta
-Software	-Viáticos
-Acervo bibliográfico	-GPS
-Imágenes satelitales	-Brújula
-Información vectorial	-Clinómetro
-Mapas temáticos	-Cintas métricas
-GPS	-Cintas diamétricas
	-Radios
	-Binoculares
	-Cámara digital
	-Formularios de campo
	-Libreta de campo

Cuadro 2. Materiales para el levantamiento de la información. Elaboración propia.

3.1.4.2 Instalación de sitio de muestreo

Una vez establecidos los sitios de muestreo se inició con el levantamiento de la información, por cada sitio se siguen los siguientes pasos metodológicos para la instalación de los mismos:

- 1) Llegada al sitio de muestreo

- 2) Tomando como referencia el norte, se establece un círculo de 35.6 m de diámetro, formando los ejes X y Y dentro del círculo a partir del punto central.
- 3) Con base en los ejes X y Y se delimita una línea (perpendicular) por eje a una distancia de 1 m para cada lado.

La figura 5 muestra de manera gráfica la instalación del sitio de muestreo:

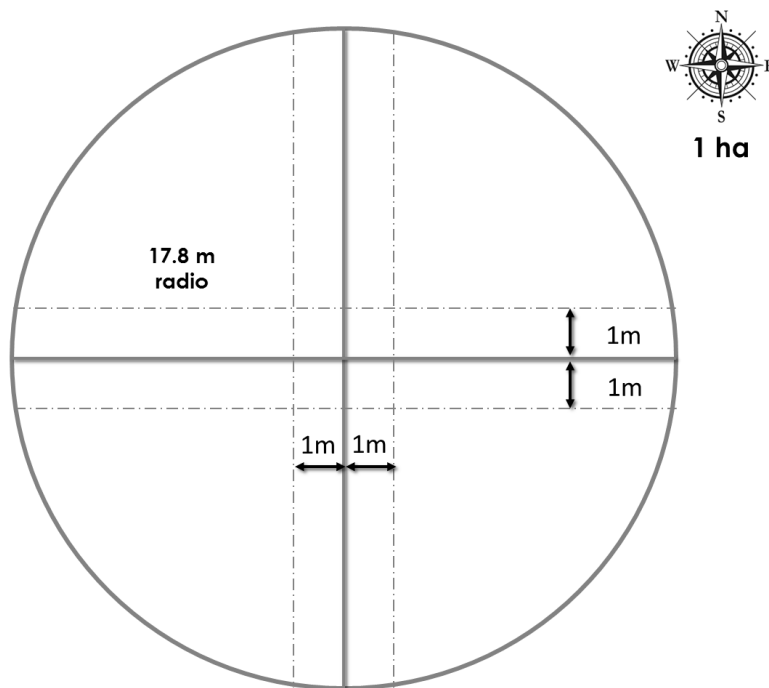


Figura 5. Diseño de la instalación de sitio de muestreo. Elaboración propia.

Una vez instalado el sitio se inicia con el levantamiento de la información (Fotografía 5). Las mediciones que se realizan por sitio son: fustales en el área total del círculo, plántulas, brinzales, latizales así como árboles juveniles en las líneas perpendiculares a los ejes establecidas a 1 m de distancia. La figura 6 muestra las áreas en donde se realizan las respectivas mediciones.

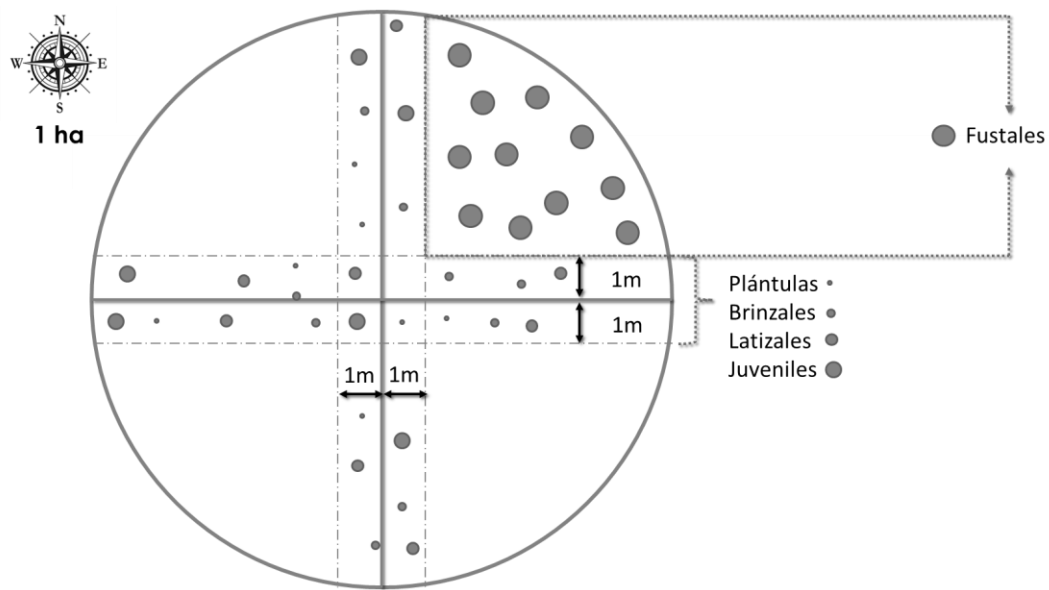


Figura 6. Diseño de la instalación de sitio de muestreo y mediciones a realizar por área. Elaboración propia.

La información recolectada en campo se divide en dos formularios. Formulario a) se recolecta información general por sitio de muestreo (Figura 7), formulario b) se recolecta información por individuo (Figura 8).

Formulario a)

Datos de sitio:										Incendios:		% Herbáceo		% Arbustivo	
Fecha:				Árboles caídos:											
Sitio	X		Y		Z	Exposición°		Pendiente	Densidad bosque		Tocones diámetro basal:				
	Presencia de excretas:					Esp Herbaceas:									
	Tipo de muérdago:					Esp Arbustivo:									
AB (m2/ha):	Descortezador:				Cant:		Asociación de árboles:								
	Plántulas				Brinzales				Latizales						
Especie	(cant)	Enfermo	Promedio	Muerto	(cant)	Enfermo	Promedio	Muerto	(cant)	Enfermo	Promedio	Muerto			
Pino															
Oyamel															
Encino															
Aile															
Otro															

Figura 7. Formulario de sitio. Elaboración propia.

Formulario b)

Formulario para recolección de datos por individuo										
Sitio	Especie	DAP	Cal	HT	HC	San. Muer.		Tipo/Muer	San. Desc.	Observaciones

Figura 8. Formulario por individuo. Elaboración propia.



Fotografía 5. Muestreo en campo. Obtenida en campo

3.1.4.3 Determinación del nivel de infestación por muérdago en el bosque de pino mediante trabajo de campo

Para determinar el nivel de infestación de muérdago en el pino se aplicaron los principios del sistema de evaluación de 6 clases planteado por Hawksworth (1977), que consiste en dividir al individuo en tres tercios calificando cada uno de ellos de 0 a 2 dependiendo su nivel de infestación. A continuación, se describe paso a paso la metodología a seguir:

- 1) Dividir el individuo en 3 tercios (Figura 9).

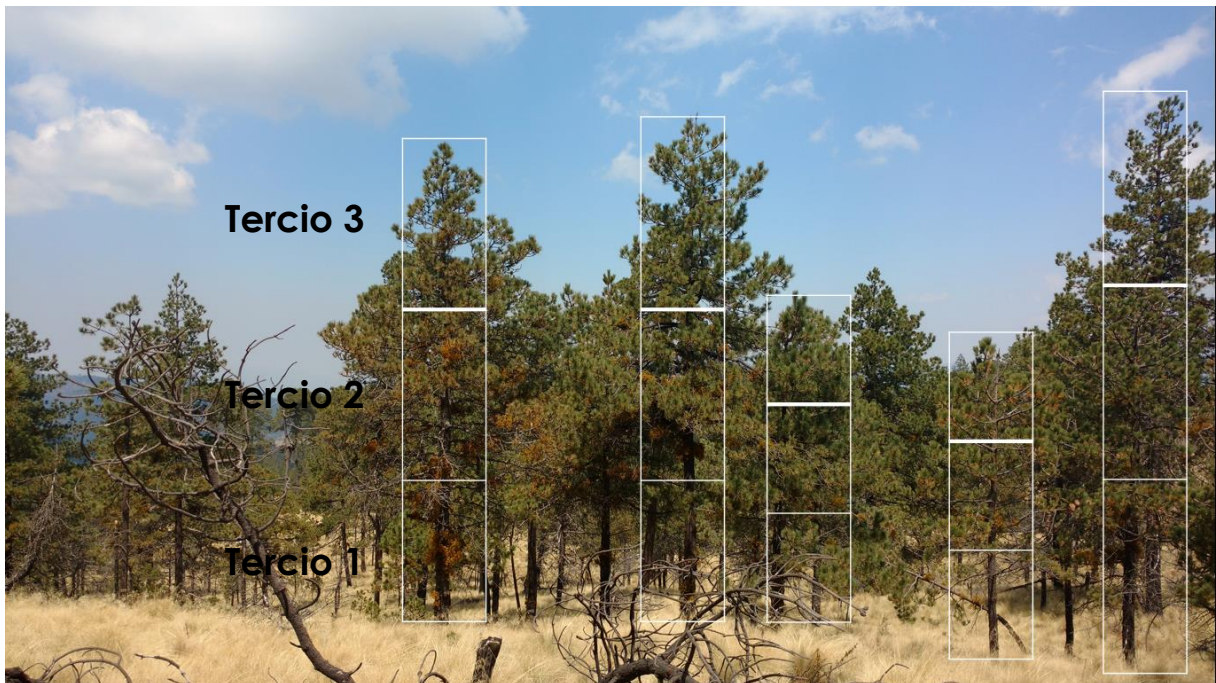


Figura 9. División del árbol en tercios. Elaboración propia

- 2) Evaluar cada tercio por separado. A cada tercio se le dará una calificación de 0, 1 o 2 con base en el cuadro 3.

Nivel de muérdago por tercio	Calificación
Infección no visible	0
Infección ligera ($\frac{1}{2}$ o menos de las ramas infectadas)	1
Infección severa (más de $\frac{1}{2}$ de las ramas infectadas)	2

Cuadro 3. Evaluación de cada tercio según características. Elaboración propia, con base en Hawksworth, 1977.

- 3) Sumar los valores de clasificación de cada tercio para obtener su nivel de infección (Figura 10).

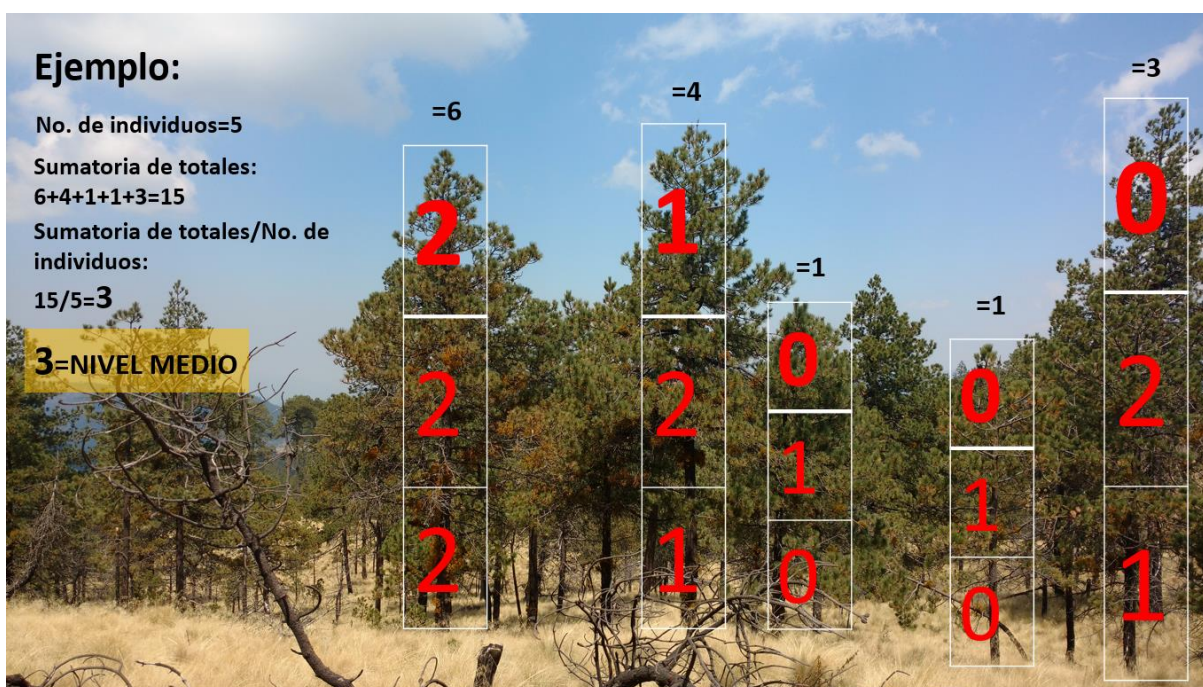


Figura 10. Clasificación de infestación. Elaboración propia

- 4) Se clasificaron los sitios por nivel de infestación con base en el promedio de las calificaciones finales de cada uno de los árboles medidos por sitio.

3.2 Análisis de los factores ambientales que influyen, determinan o condicionan la presencia de muérdago mediante modelos estadísticos

La figura 11 hace referencia a los pasos a seguir en la segunda etapa metodológica del proceso de ésta investigación, la cual hace énfasis en el procesamiento de la información, así como al análisis y presentación de los resultados.

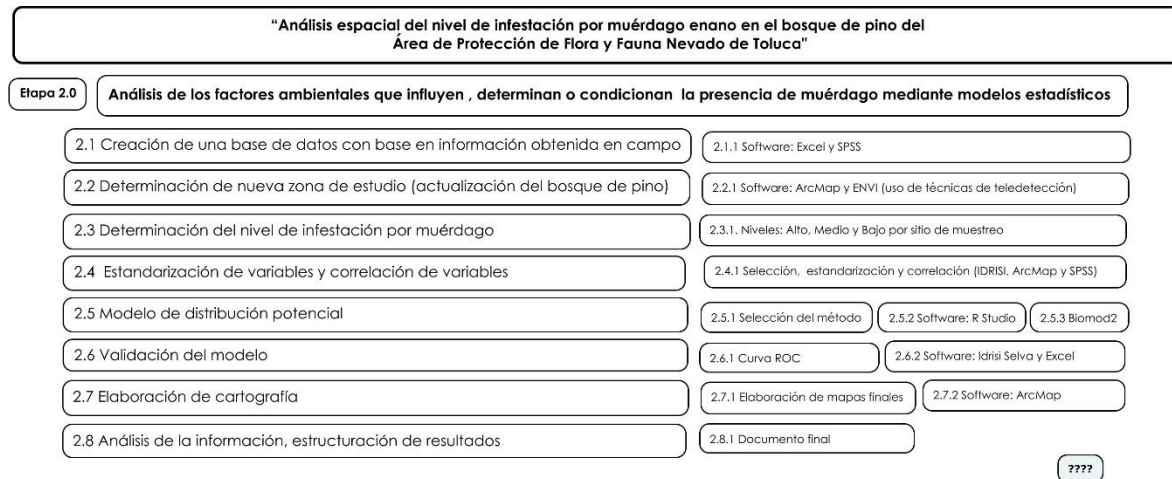


Figura 11. Esquema metodológico, etapa 2.0. Elaboración propia.

3.2.1 Creación de una base de datos con información obtenida en campo:

Como resultado del trabajo de campo se obtuvieron dos bases de datos, la primera hace referencia a los registros de sitios y, la segunda a los registros por individuo.

El proceso inicial para la generación de la base (captura de datos) se realizó en Excel y posteriormente se migró al software *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) debido a la cantidad de información a procesar.

3.2.2 Determinación de la nueva superficie de bosque de pino.

Una vez teniendo homogenizada la base de datos se realizó la actualización del mapa del bosque de pino, basado en técnicas de teledetección, tomando como referencia los sitios de muestreo correspondientes sólo al bosque de pino y sitios que tuvieran algún tipo de asociación siempre y cuando la especie dominante fuera pino.

3.2.3 Determinación de nivel de infestación por sitio de muestreo:

Con base en la metodología de F. Hawksworth propuesta en 1977, se establecieron los niveles de infestación por individuo. Se tomó en cuenta el promedio del total de árboles muestreados por sitio, de tal manera que a la clasificación 0 se le asignó nivel de infestación Nulo, a las clasificaciones 1 y 2 nivel Bajo, clasificaciones 3 y 4 nivel Medio y finalmente a las clasificaciones 5 y 6 nivel Alto, tal como lo muestra el cuadro 4.

Clase	Características	Clasificación
0	Árbol sano	Nulo
1	Muérdago muy escaso en una sección	Bajo
2	Normalmente con muérdago escaso en dos secciones o abundante en una sola sección.	
3	Infestación muy escasa, aunque tiende a distribuirse en las tres secciones.	Medio
4	Muérdago en todo el árbol aunque abunda sólo en una sección.	
5	Infestación abundante en casi todo el árbol.	Alto
6	Infestación abundante en todo el árbol.	

Cuadro 4. Clasificación según nivel de infestación. Elaboración propia, con base en Hawksworth, 1977.

Para obtener la clasificación final en la base de datos, primero (por individuo) se sumaron las calificaciones correspondientes a cada tercio y se obtuvo un total dentro de un rango de 0 a 6 (según el caso), posteriormente se realizó un promedio de las sumatorias totales, correspondientes a cada individuo (por sitio), de tal manera que se obtuvo la clase de Hawksworth, una vez obtenida se asignó la clasificación final para cada sitio. En el cuadro 5 se describe un ejemplo de lo antes mencionado:

Sitio X.			Total de individuos muestreados = 3		
Número de individuos muestreados	Calificación y sumatoria de tercios	Total de sumatoria	Promedio (total de la sumatoria / total de árboles)	Nivel de infestación F. Hawksworth	Clasificación final asignada
Individuo 1	2+1+2=	5	$5+4+2=12$ $12/3=4$	Clase 4 = Muérdago en todo el árbol, aunque abunda sólo en una sección.	Nivel de infestación (4) Medio
Individuo 2	2+2+1=	5			
Individuo 3	0+1+1=	2			

Cuadro 5. Metodología para asignar clasificación al sitio según nivel de infestación. Elaboración propia, con base en Hawksworth, 1977.

3.2.4 Elaboración de cartografía:

Una vez asignada la clasificación final de nivel de infestación por individuo, se procedió a realizar la liga a la base de datos de sitio, con la finalidad de representarla cartográficamente.

3.2.4.1 Mapas temáticos del APFFNT: Interpolación de vecinos naturales (Natural Neighbor).

Tomando como insumo la base de datos generada se realizó la cartografía vectorial correspondiente en entidades de puntos y polígonos, con la finalidad de responder a las preguntas ¿Cuál es la distribución de los tipos

de muérdago? ¿Cuál es la distribución del nivel de infestación? Y ¿Cuánta superficie está siendo afectada por muérdago y en qué nivel? y de ésta manera apoyar en la toma de decisiones encaminadas al manejo y conservación de los bosques del Nevado de Toluca. Con base en la cartografía generada de sitios de muestreo se aplicó la metodología de Interpolación Natural Neighbor.

La interpolación de vecinos naturales encuentra el subconjunto más cercano de muestras de entrada a un punto de consulta y les aplica los pesos en función de áreas proporcionadas para interpolar un valor (Sibson, 1981). También se conoce como interpolación de Sibson o "de hurto de área".

La interpolación de vecinos naturales es local, solo usa un subconjunto de muestras alrededor de punto de consulta y se garantiza que las alturas interpoladas están dentro del rango de muestras utilizadas. No deduce tendencias y no generará picos, depresiones, crestas o valles que aún no estén representados por las muestras de entrada. La superficie pasa a través de las muestras de entrada y es suave en todas partes, excepto en las ubicaciones de las muestras de entrada. Se adapta localmente a la estructura de los datos de entrada y no requiere ninguna entrada por parte del usuario en relación al radio de búsqueda, el recuento de la muestra o a la forma. Funciona igualmente bien con datos distribuidos regular e irregularmente (Watson, 1992).

Los vecinos naturales de cualquier punto son aquellos asociados a los polígonos de Voronoi (Thiessen) cercanos.

3.2.5 Modelo de distribución potencial:

Un MDE, es una construcción numérica que define en el espacio ecológico las relaciones que existen entre la presencia de una especie y los valores de variables ambientales con influencia en su distribución. El resultado se expresa en el espacio geográfico como un mapa digital que representa la idoneidad del hábitat o la probabilidad de presencia de la especie (según el método utilizado para construir la relación) (Pando, 2009).

La variedad de métodos que se pueden usar para construir MDE y la variedad de formas en que tales modelos pueden ser implementados, permite flexibilidad sustancial en la complejidad del modelo. Los investigadores deben limitar la complejidad de sus modelos basado en el objetivo del estudio, los atributos de los datos, y una comprensión de cómo estos interactúan con los factores físico-ambientales. (Merow *et al.*, 2014).

Se realizó un modelo de distribución potencial en el software R por medio del módulo Biomod2, analizando previamente cuál es el mejor método, sus potencialidades e inconvenientes y los factores limitantes tomando en cuenta la información recolectada en campo.

3.2.5.1 Selección, obtención y estandarización de las variables

Hay cinco elementos a destacar en cualquier MDE: registros de presencia de la especie, variables ambientales almacenadas como mapas digitales, un algoritmo que analiza la relación entre ambas entradas, un modelo definido en el espacio ecológico, y la representación geográfica del resultado en forma de mapa (López, 2012).

En este apartado haremos referencia a las características particulares de las variables que se tomaron en cuenta para la generación del modelo de potencialidad, las cuales fueron: Altitud, corrientes de agua, densidad de

bosque de pino, edafología, erosión, exposición de laderas, localidades, nivel de infestación de muérdago, pendiente, vías de acceso, y 17 bioclimáticas.

Dichas variables fueron obtenidas de diferentes fuentes (Cuadro 6) por lo que se realizó una estandarización de las mismas (200 m de resolución) (Figura 12) con la finalidad de que al momento de generar el modelo no existieran errores o resultados no confiables, en total se consideraron 27 variables para la elaboración del modelo.

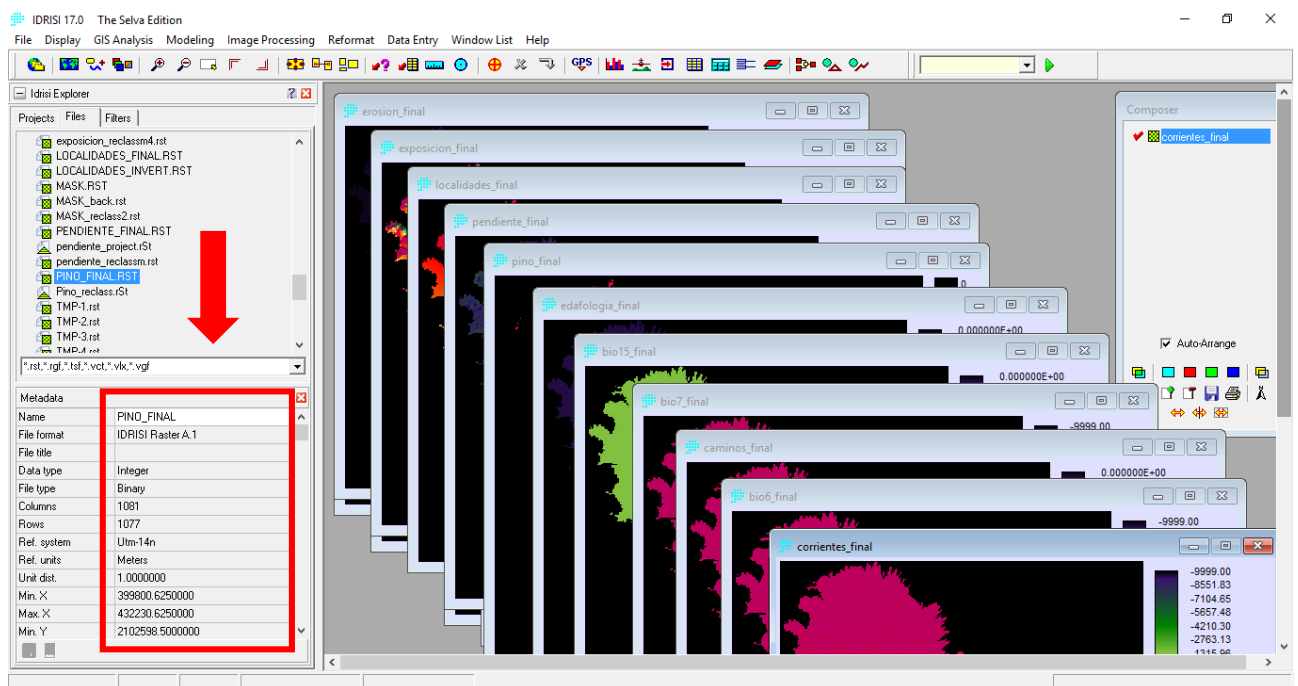


Figura 12. Estandarización de variables. Elaboración propia.

No.	Variable	Fuente	Unidad de medición	Tipo de Valor
1	Altitud	Elaboración propia a partir de un MDE, Alos Palsar, 2016.	Metros sobre el nivel del mar	Continua
2	Distancia a corrientes de agua	INEGI	Kilómetros	Continua
3	Densidad de bosque de pino	Héctor Hugo Regil, 2009.	Hectáreas	Continua
4	Edafología	Digitalización con base en carta topográfica 1: 50000	Hectáreas	Continua
5	Erosión	Con base en Héctor Hugo Regil, 2009.	Porcentaje	Continua
6	Exposición de laderas	Elaboración propia a partir de un MDE, Alos Palsar, 2016.	Grados	Continua
7	Distancia a localidades	INEGI	Kilómetros	Continua
8	Pendiente	Elaboración propia a partir de un MDE, Alos Palsar, 2016.	Grados	Continua
9	Vías de acceso	INEGI	Kilómetros	Continua
10	Presencia del muérdago	Elaboración propia a partir de trabajo de campo.	Puntos	Variable dependiente
11	Bio 1. Temperatura promedio anual	Worl clim	C°	Continua
12	Bio 4. Estacionalidad de la temperatura.	Worl clim	%	Continua
13	Bio 5. Temperatura máxima promedio del periodo más cálido.	Worl clim	C°	Continua
14	Bio 6. Temperatura mínima promedio del periodo más frío.	Worl clim	C°	Continua

15	Bio 7. Oscilación anual de la temperatura.	Worl clim	C°	Continua
116	Bio 8. Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso.	Worl clim	C°	Continua
17	Bio 9. Temperatura promedio del cuatrimestre más seco.	Worl clim	C°	Continua
18	Bio 10. Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido.	Worl clim	C°	Continua
19	Bio 11. Temperatura promedio del cuatrimestre más frío.	Worl clim	C°	Continua
20	Bio 12. Precipitación anual.	Worl clim	mm	Continua
21	Bio 13. Precipitación del periodo más lluvioso.	Worl clim	mm	Continua
22	Bio 14. Precipitación del periodo más seco.	Worl clim	mm	Continua
23	Bio 15. Estacionalidad de la precipitación	Worl clim	%	Continua
24	Bio 16. Precipitación del cuatrimestre más lluvioso.	Worl clim	mm	Continua
25	Bio 17. Precipitación del cuatrimestre más seco.	Worl clim	mm	Continua
26	Bio 18. Precipitación del cuatrimestre más cálido.	Worl clim	mm	Continua
27	Bio 19. Precipitación del cuatrimestre más frío.	Worl clim	mm	Continua

Cuadro 6. Características de las variables seleccionadas para el modelo de distribución potencial. Elaboración propia.

3.2.5.2 Correlaciones espaciales de las variables.

La técnica de correlación es fundamental en la explicación de muchos fenómenos relacionados con el campo animal y vegetal. Un coeficiente de correlación, mide el grado de relación o asociación existente generalmente entre dos variables aleatorias. (Restrepo y González, 2007).

La correlación de Pearson tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta. (Restrepo y González, 2007)

3.2.5.2.1 Aplicación de correlación de Pearson entre nivel de infestación y variables geográficas mediante SPSS.

Para poder estimar la correlación en primer lugar se obtuvo el valor original de cada uno de los sitios muestreados con respecto a cada una de las variables tomadas en cuenta. Dicho proceso se realizó en el software ArcMap, posteriormente se ejecutó una correlación de Pearson en el software SPSS, tomando en cuenta la variable dependiente (presencia de muérdago) con las variables independientes (variables geográficas seleccionadas) con la finalidad de saber cuáles son las que influyen directamente en la presencia del muérdago.

3.2.5.2.2 Aplicación de correlación de Pearson entre las variables seleccionadas mediante SPSS.

Una vez obtenida la correlación previa se toman en cuenta las variables que tuvieron una menor correlación con la presencia de la especie, pero mayor nivel de significancia, lo que quiere decir que, éstas variables explican en mayor medida la presencia del muérdago. Sin embargo, ahora necesitamos saber que tan correlacionadas se encuentran éstas variables entre sí, por lo

cual se realiza una correlación entre las variables resultantes sin tomar en cuenta el nivel de infestación.

3.2.5.3 Generación del modelo, BIOMOD 2 a través de R.

Una reciente aproximación es utilizar "ensambles de técnicas" (Araujo y New, 2007; Marmion *et al.*, 2008), con el objetivo de disminuir las incertidumbres asociadas a los modelos de distribución, especialmente en relación a la validez estadística de los resultados (Pliscoff y Fuentes, 2011), por lo que se obtuvo un ensamble de los métodos GLM, MAXENT y SRE para ésta investigación, a través de BIOMOD 2.

BIOMOD es una plataforma informática para la predicción de conjuntos de distribución de especies, que permite el tratamiento de una serie de incertidumbres metodológicas en los modelos y el examen de las relaciones entre especies y medio ambiente. BIOMOD incluye la capacidad de modelar distribuciones de especies con varias técnicas, modelos de prueba con una amplia gama de enfoques, distribución de especies de proyecto en diferentes condiciones ambientales (por ejemplo, escenarios de cambio climático o de uso de la tierra) y funciones de dispersión. Permite evaluar la rotación temporal de especies, trazar curvas de respuesta de especies y probar la fuerza de interacción de especies con variables predictoras. BIOMOD se implementa en R y es un paquete gratuito, de código abierto. (Thuiller, 2009).

El cuadro 7 muestra una comparación de algunas de las principales técnicas para la generación de modelos de distribución.

Técnicas (BM = presente en software BIOMOD)	Nombre completo	Referencia	Estudios comparativos					
			A	B	C	D	E	F
ANN (BM)	<i>Artificial Neural Networks</i>	Lek <i>et al.</i> (1996)					+	
BIOCLIM (BM = SRE)	<i>Bioclimatic Envelope Algorithm</i>	Busby (1991)	-	-				±
BRT (BM)	<i>Boosting Regression Trees</i>	Friedman (2001)	+			+		
CART (BM)	<i>Classification And Regression Trees</i>	Vayssieres <i>et al.</i> (2000)			-	-	±	
ENFA	<i>Ecological Niche Factor Analysis</i>	Hirzel <i>et al.</i> (2002)					-	-
GAM (BM)	<i>Generalized Additive Models</i>	Hastie & Tibshirani (1990)	±	+	+		±	
GARP	<i>Genetic Algorithm for Rule-set Production</i>	Stockwell & Peters (1999)	±		-			+
GDM	<i>Generalised Dissimilarity Modelling</i>	Ferrier <i>et al.</i> (2007)	+					
GLM (BM)	<i>Generalized Linear Models</i>	McCullagh & Nelder (1989)	±		+		±	
MARS (BM)	<i>Multivariate Adaptive Regression Splines</i>	Friedman (1991)	±			-		
MAXENT	<i>Maximum Entropy</i>	Phillips <i>et al.</i> (2006)	+	+				
RF (BM)	<i>Random Forest</i>	Breiman (2001)				+		

Referencias para los estudios comparativos: A = Elith *et al.* (2006), B = Hijmans & Graham (2006), C = Meynard & Quinn (2007), D = Prasad *et al.* (2006), E = Segurado & Araujo (2004), F = Tsoar *et al.* (2007). La evaluación de las técnicas es indicada como: -- (muy mal), - (mal), ± (promedio) o + (buena).

Cuadro 7. Estudios comparativos de modelos. Fuente: Modificado de Van Strien, 2008, en Pliscoff y Fuentes, 2011.

El modelo se realizó en el módulo de BIOMOD2 a través del software R (ver figura 10), ya que se implementa en él y es un programa gratuito, de código abierto, para lo cual se generó una malla (en formato .csv) de 200 X 200 debido a la información que se tenía en campo con respecto a la zona de estudio (resolución a la cual se trabajaron todas las variables) en dicha malla se colocaron presencias (1), ausencias (0) y sin valor (NA). Una vez teniendo las variables estandarizadas y la malla se utilizó el código pertinente para la generación del modelo. Cabe mencionar que el modelo resultante es un ensamble de diferentes métodos (GLM, MAXENT Y SRE) para un resultado de

mayor confiabilidad. El modelo se realizó con el 75 % del total de los datos recolectados directamente de campo. La figura 13 muestra gráficamente los requerimientos para la generación del ensamble.

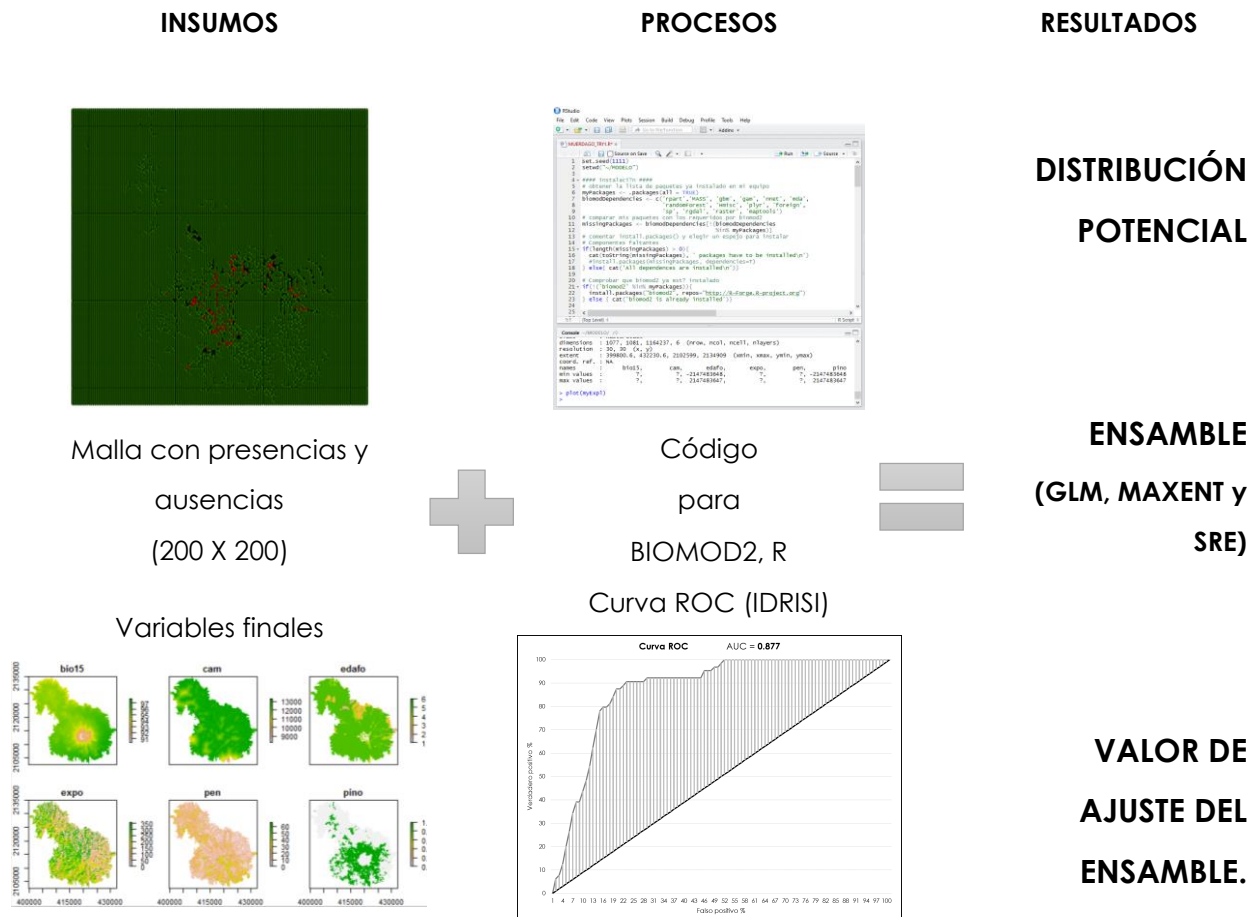


Figura 13. Requerimientos para la generación del ensamble de modelos en R Studio. Elaboración propia.

3.2.6. Validación del modelo, método: Curva ROC, IDRISI SELVA.

La calibración del modelo se refiere a los análisis estadísticos asociados a buscar el ajuste del modelo que posteriormente se proyectará en el espacio geográfico (Pliscoff y Fuentes, 2011).

La evaluación o validación se enfoca en la caracterización de la confiabilidad de los resultados de los modelos, más que en la definición de uno como correcto o incorrecto (Allouche *et al.*, 2006).

La forma correcta de evaluar el resultado sería comparándolo con un conjunto de presencias independientes al que se está usando, esto aborda procediendo a dividir el conjunto de datos en dos sets: uno de calibración y otro de evaluación (Guisan y Zimmermann, 2000).

Cabe señalar que para este caso fue posible dividir el conjunto de datos en 2 sets debido a la cantidad de información obtenida en campo.

Con base en lo anterior se utilizó el 25% de los datos de campo para generar la curva ROC en el software Idrisi selva (Figura 14), y posteriormente se graficó en Excel, con la finalidad de obtener el valor de umbral.

El método umbral independiente más conocido es el AUC (Area under the curve) (Lori y Margaret, 2003), que se obtiene comparando la proporción de falsos y verdaderos positivos, es decir, desplegando en dos ejes X y Y, la proporción de falsos positivos (especificidad) y en el eje Y la proporción de positivos verdaderos (sensibilidad) (Pliscoff y Fuentes, 2011).

La precisión de un modelo es mayor cuando la proporción de positivos verdaderos es mayor a la de positivos falsos, lo que se expresa gráficamente en una curva que mientras mayor sea su precisión, más se acercará a la esquina izquierda del gráfico, generando un "área de curva" mayor. Esto es lo que refleja el AUC; se estima que valores sobre 0,9 de AUC dan cuenta de

modelos con alta precisión y valores entre 0,7 y 0,9 indican modelos con buena precisión (Thullier *et al.*, 2009).

Para este caso se determinaron las zonas potenciales y las zonas no potenciales con base en el umbral de corte (139) y se obtuvo el mapa de potencialidad del muérdago (el valor correspondiente al falso positivo: 139, del verdadero positivo: valor más cercano a la parte superior izquierda del gráfico (Figura 15), Finalmente se realizó la clasificación pertinente.

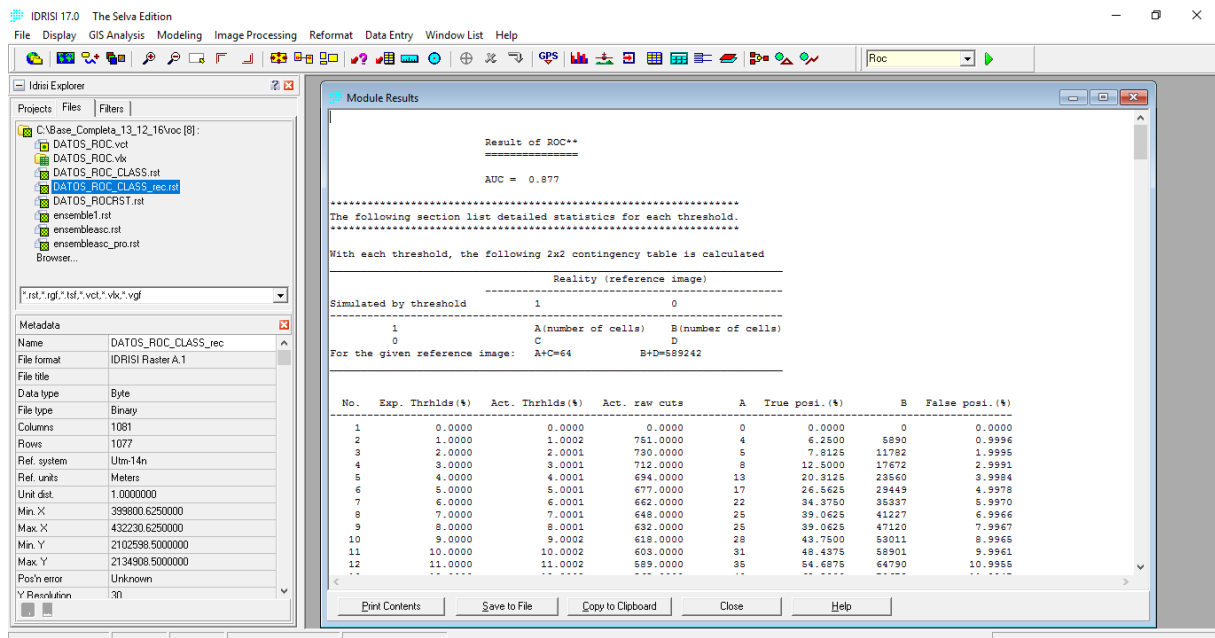


Figura 14. Generación de Curva ROC. Elaboración propia.

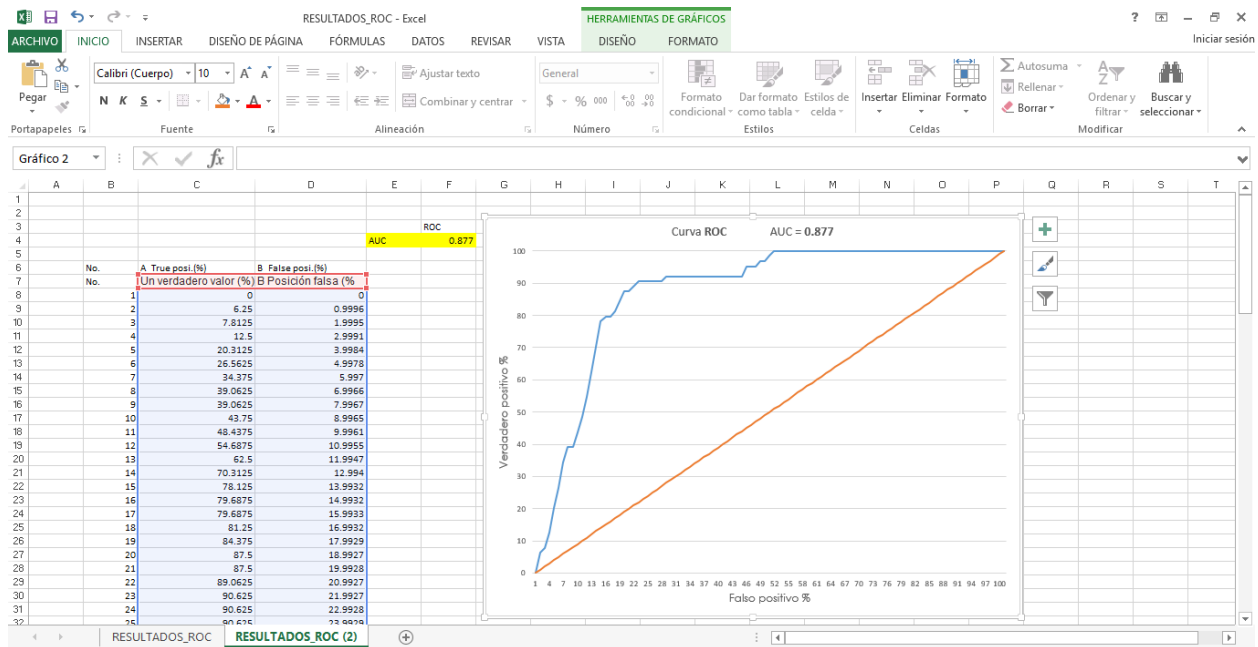


Figura 15. Determinación de umbral en Curva ROC. Elaboración propia.

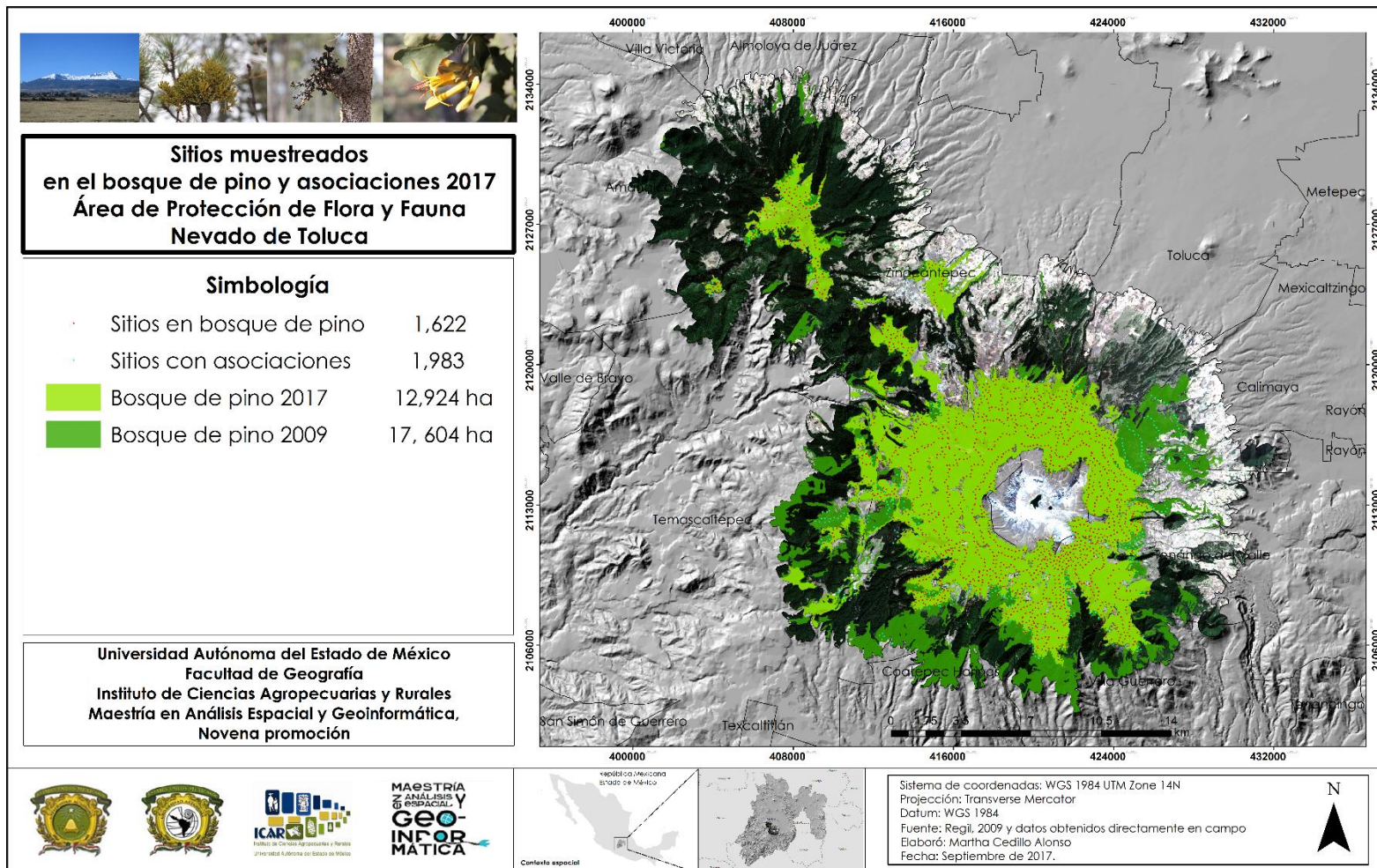
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

4.1 Distribución espacial de plantas parásitas en el bosque de pino.

Con base en el método utilizado para la recolección de la información en campo se generaron 1,622 sitios de muestreo, distribuidos en el bosque de pino (Fotografía 6), de tal manera que se obtuvieron 12,924 ha (Mapa 9), que con relación a lo reportado por Regil en 2009 (17, 604 ha) es menor en un 27%, debido a que en esta investigación se hace énfasis al bosque nativo de pino (*P. hartwegii*). Cabe mencionar que los procesos, análisis y resultados de esta investigación son basados en la nueva superficie de pino planteada.



Fotografía 6. Muérdago enano en el bosque del Nevado de Toluca. Obtenida en campo.



Mapa 9. Sitios de muestreo en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

4.2 Presencia – ausencia de muérdago.

Los resultados indican un diagnóstico sobre las condiciones fitosanitarias del bosque de pino del Nevado de Toluca (Mapa 10), en donde se refleja que poco más del 40% de los sitios de muestreo realizado presentan algún tipo de muérdago (Gráfico 1). De acuerdo con las cifras mostradas, el muérdago negro se reporta con mayor presencia (47%), seguido del amarillo (46%).

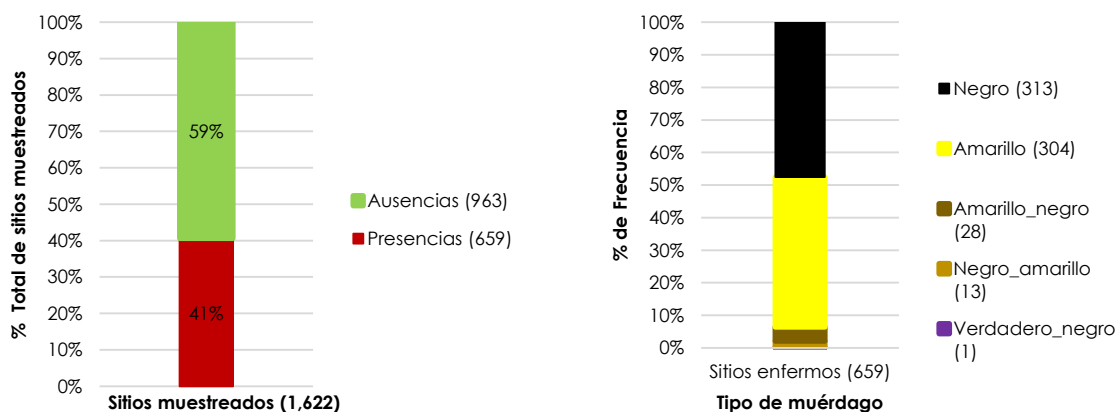
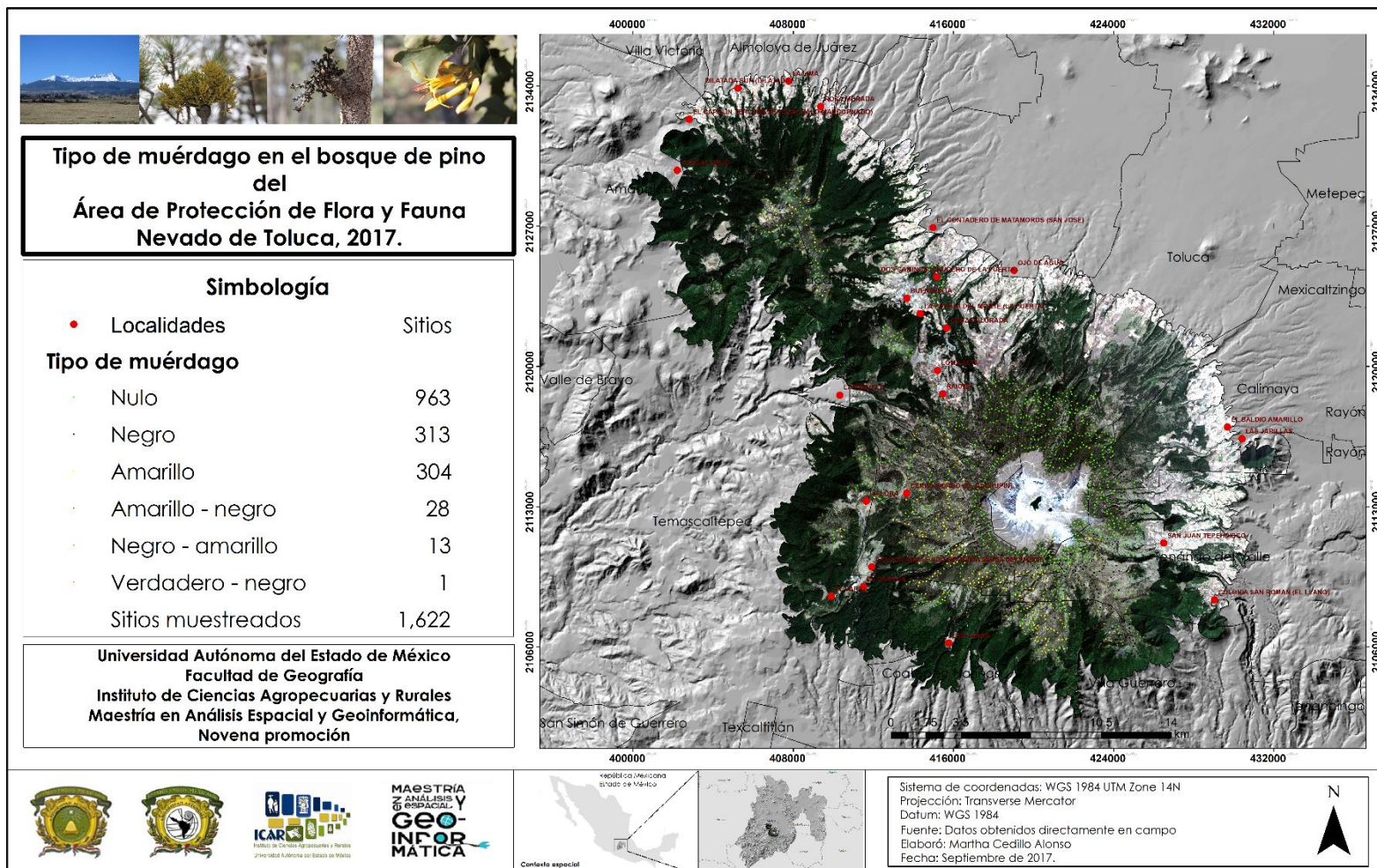


Gráfico 1. Total de sitios con presencias y ausencias de muérdago. Elaboración propia.



Mapa 10. Tipo de muérdago en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

4.3 Análisis de las superficies infestadas.

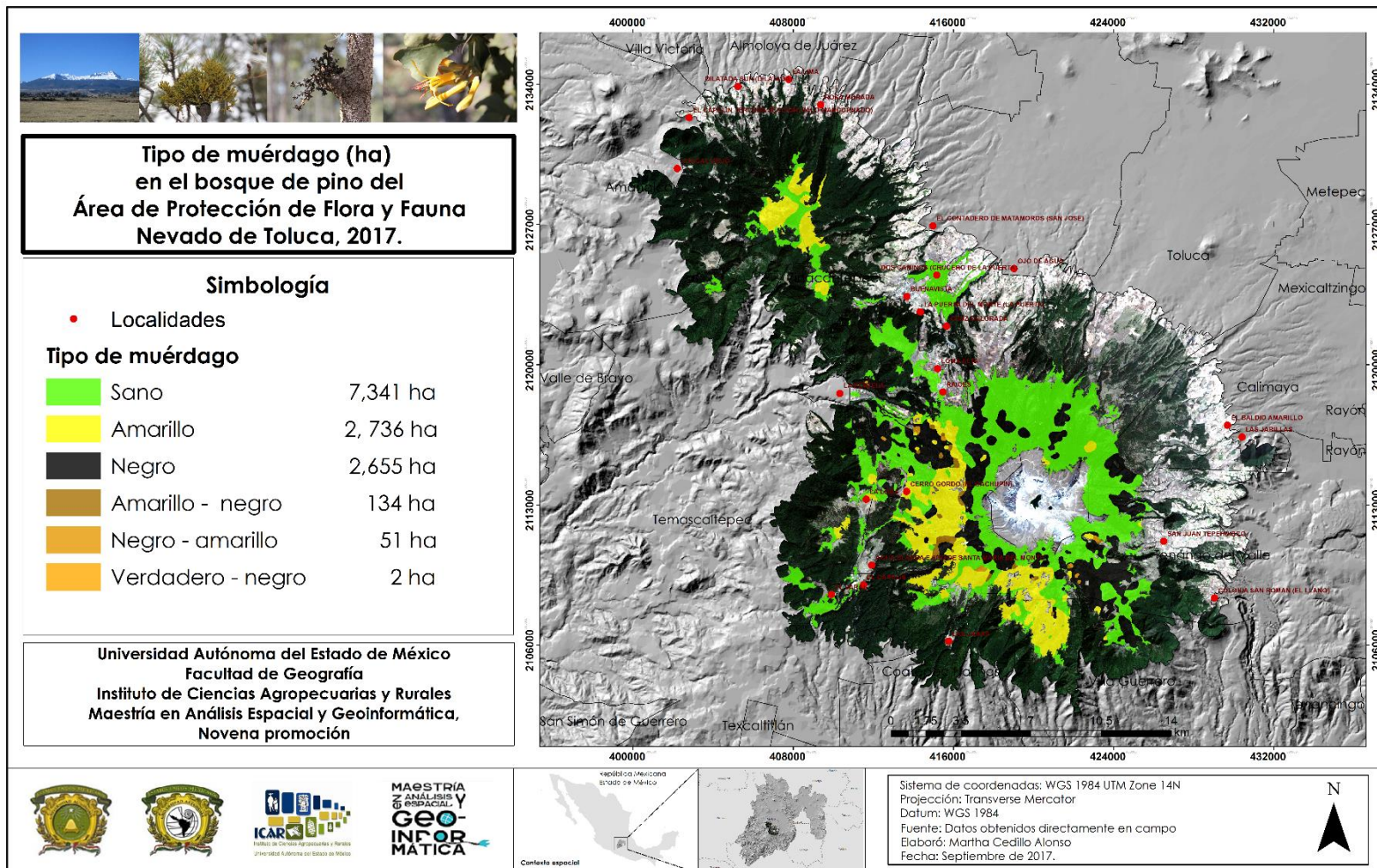
Una vez identificado el tipo de muérdago por sitio de muestreo, se realizó la conversión correspondiente a polígonos con base en la metodología de vecinos naturales antes mencionada. El bosque de pino cuenta con 5,583 ha infestadas (43%), por muérdago amarillo y negro respectivamente (Mapa 11). Las zonas que se encuentran afectadas por algún tipo de muérdago se relacionan de manera directa con los resultados obtenidos del modelado de distribución potencial, en donde | las variables que resultaron con mayor importancia para el desarrollo de la planta parásita fueron: Densidad del bosque (38%), Estacionalidad de la precipitación (25%), Distancia a caminos (20%), Edafología (8%), Exposición de laderas (6%) y Pendiente (4%).

Se generó la distribución espacial de la fragmentación del bosque de pino con base en el número de árboles por ha (189) (Mapa 12), dicho resultado se divide en 4 categorías árboles aislados (menos del 10% del número de árboles por hectárea (< 19) (FRA, 2015), bosque fragmentado ($\geq 19 < 150$), bosque semidenso ($\geq 150 < 336$) y bosque denso (> 336) (Endara *et al.*, 2012) (Cuadro 8).

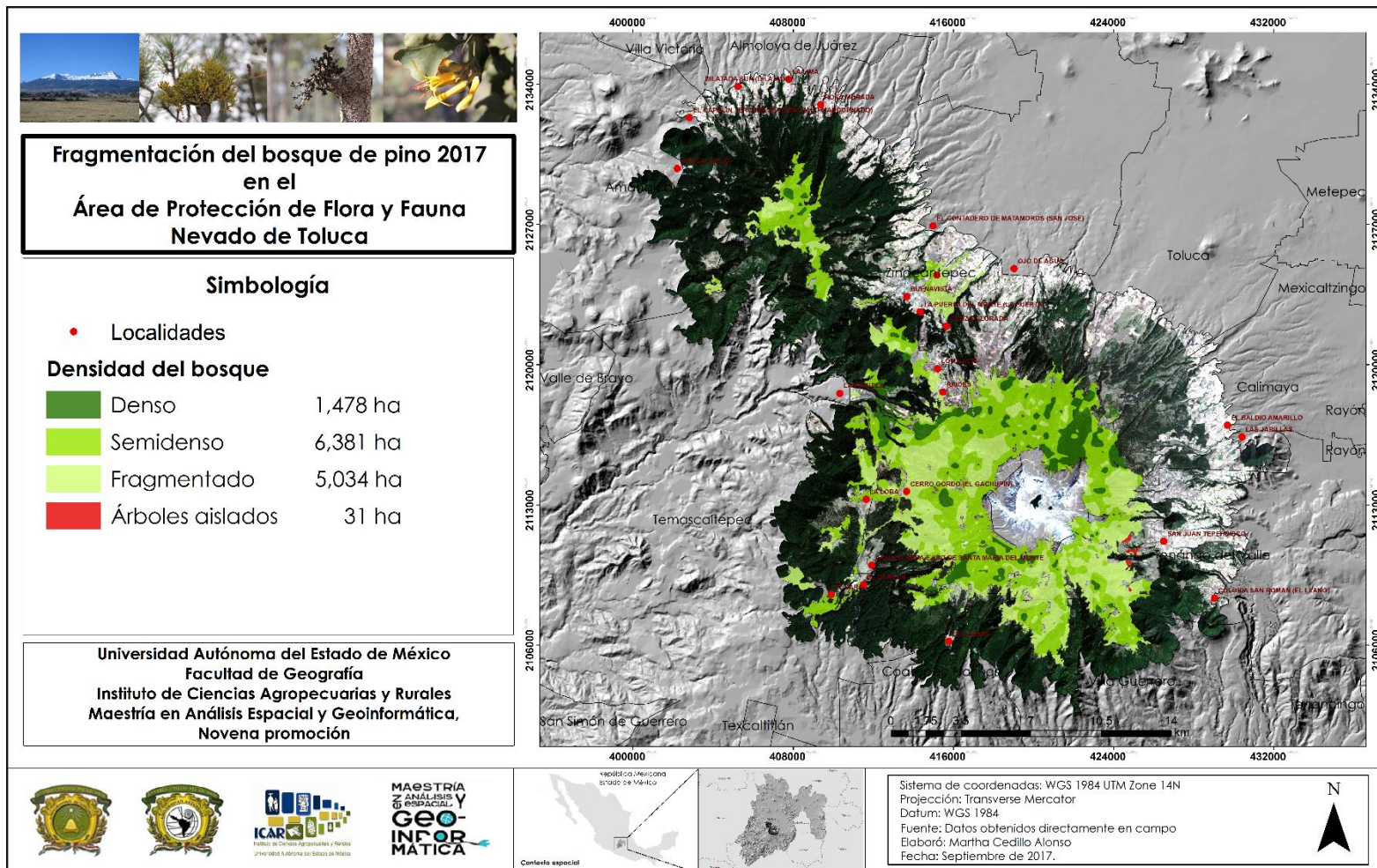
Categoría	Total de árboles por hectárea	Superficie (ha)	Superficie con muérdago (ha)	Extracción (%)
Árboles aislados	7	31	7	32%
Bosque fragmentado	92	5,034	2,381	9%
Bosque semidenso	228	6,381	2,717	4%
Bosque denso	487	1,478	476	2%

Cuadro 8. Extracción en el bosque de pino. Elaboración propia.

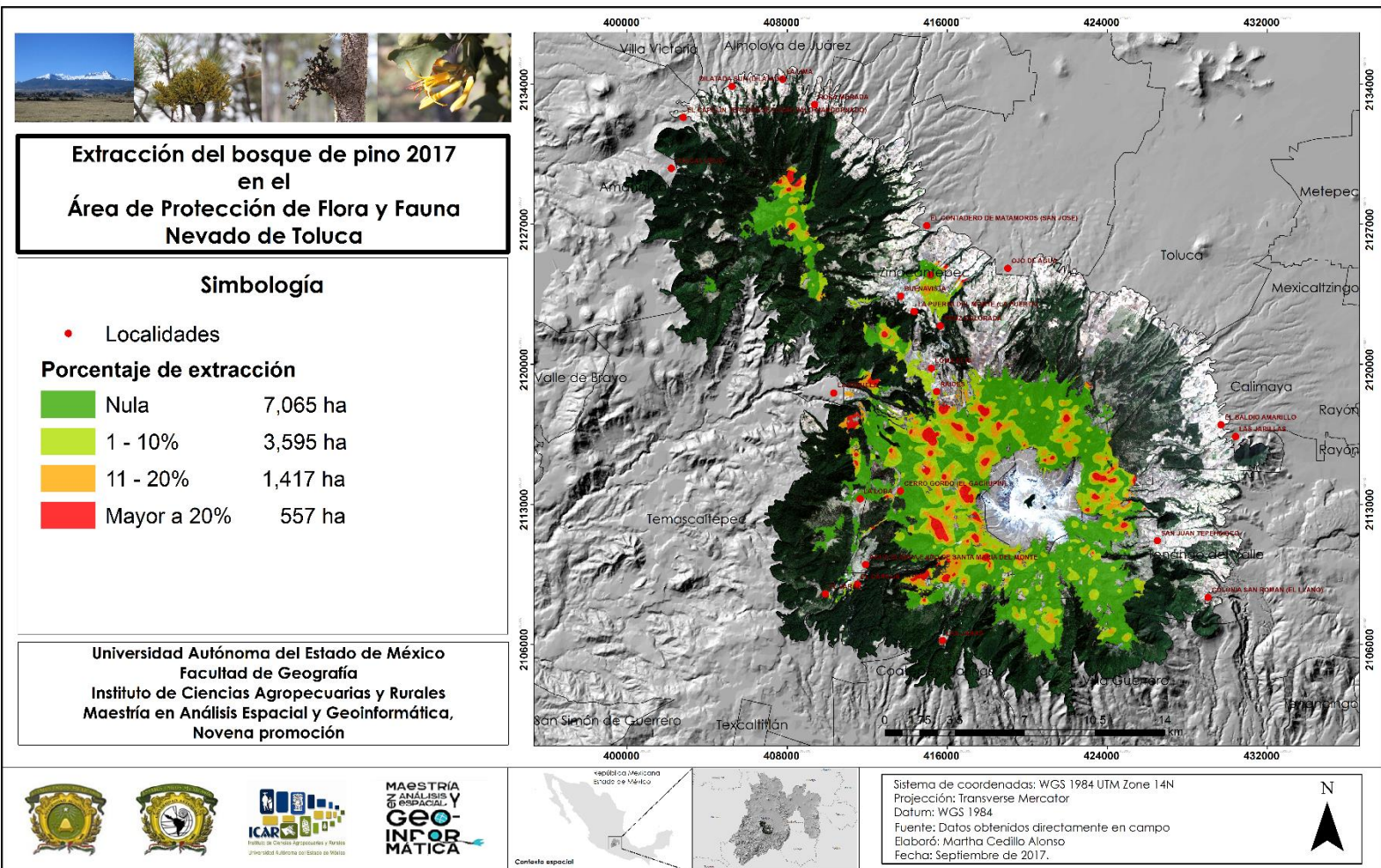
Con base en lo anterior, se establece una relación directa entre los procesos de extracción del recurso forestal en el Nevado de Toluca y la presencia del muérdago, ya que el alto porcentaje de extracción en el bosque denso (32%), deja como resultado un bosque remanente, el cual se encuentra más susceptible al ataque de dicha planta parásita (47%), debido a que se extraen los individuos con mejores características, contribuyendo a la fragmentación del bosque, lo que se relaciona directamente con los extensos km de vías de acceso que facilitan dicho proceso (Mapa 13). Con relación a la precipitación, los sitios que se encuentran con presencia de muérdago, se ubican principalmente en una zona en la que llueve en promedio 1050 mm anuales, abarcando aproximadamente el 90% de los sitios infestados, exponiendo que el muérdago requiere de zonas húmedas para su desarrollo, poco más del 70 % de los sitios con presencia de muérdago se establecen en pendientes de 0 a 36°, elemento que favorece la accesibilidad al recurso forestal y, por lo tanto, la extracción del mismo.



Mapa 11. Tipo de muérdago en hectáreas, bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.



Mapa 12.Fragmentación en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.



Mapa 13. Regeneración en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Por otro lado, se clasificaron los sitios enfermos por nivel de infestación (Mapa 14 y 15), encontrando que el 59% se encuentra en un nivel bajo (Gráfico 2), lo que representa un área de oportunidad para el tratamiento oportuno de dicha planta parásita (Cuadro 9), factor que facilita los procesos de mitigación del muérdago, sin dejar de lado la amenaza que representa su concentración en el bosque denso (Mapa 16).

La distribución de los resultados refleja que el muérdago negro suele extenderse más en el bosque de pino que el amarillo, sin embargo, este último parece ser más agresivo, ya que supera al negro en los niveles de infestación alto y medio (Fotografía 7).

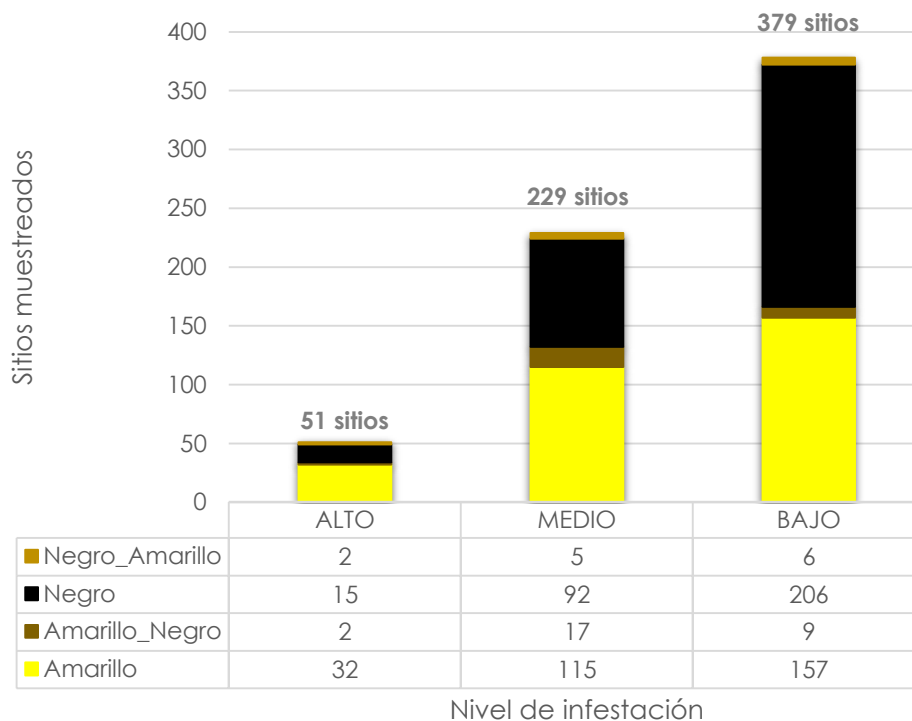


Gráfico 2. Total de sitios enfermos por tipo de muérdago y nivel de infestación. Elaboración propia.

Densidad	Alto				Medio				Bajo							
	Tipo de muérdago %				Tipo de muérdago %				Tipo de muérdago %							
	A	N	AN NA	N V	A	N	AN NA	N V	A	N	AN NA	N V				
D	1%				17%	5%	1%		7%	63%	6%					
	Porcentaje de infestación															
	0 - 25 %				25 - 50 %				50 – 75 %				75 – 100 %			
	79%				10%				8%				3%			
1,478 ha	Sin muérdago: 1,002						Con muérdago: 476 ha									

Densidad	Alto				Medio				Bajo			
	Tipo de muérdago %				Tipo de muérdago %				Tipo de muérdago %			
	A	N	AN NA	N V	A	N	AN NA	N V	A	N	AN NA	N V
S	.6%	.4%			21%	5%	2%		33%	36%	1%	1%
	Porcentaje de infestación											
	0 - 25 %		25 - 50 %		50 – 75 %		75 – 100 %					
	19%		36%		31%		15%					
6,381 ha	Sin muérdago: 3,664						Con muérdago: 2,717 ha					

Densidad	Alto				Medio				Bajo							
	Tipo de muérdago %				Tipo de muérdago %				Tipo de muérdago %							
	A	N	AN NA	N V	A	N	AN NA	N V	A	N	AN NA	N V				
F	1%	1%			14%	10%	2%		31%	40%	1%					
	Porcentaje de infestación															
	0 - 25 %				25 - 50 %				50 – 75 %				75 – 100 %			
	65%				14%				15%				7%			
5,034 ha	Sin muérdago: 2,353						Con muérdago: 2,381 ha									

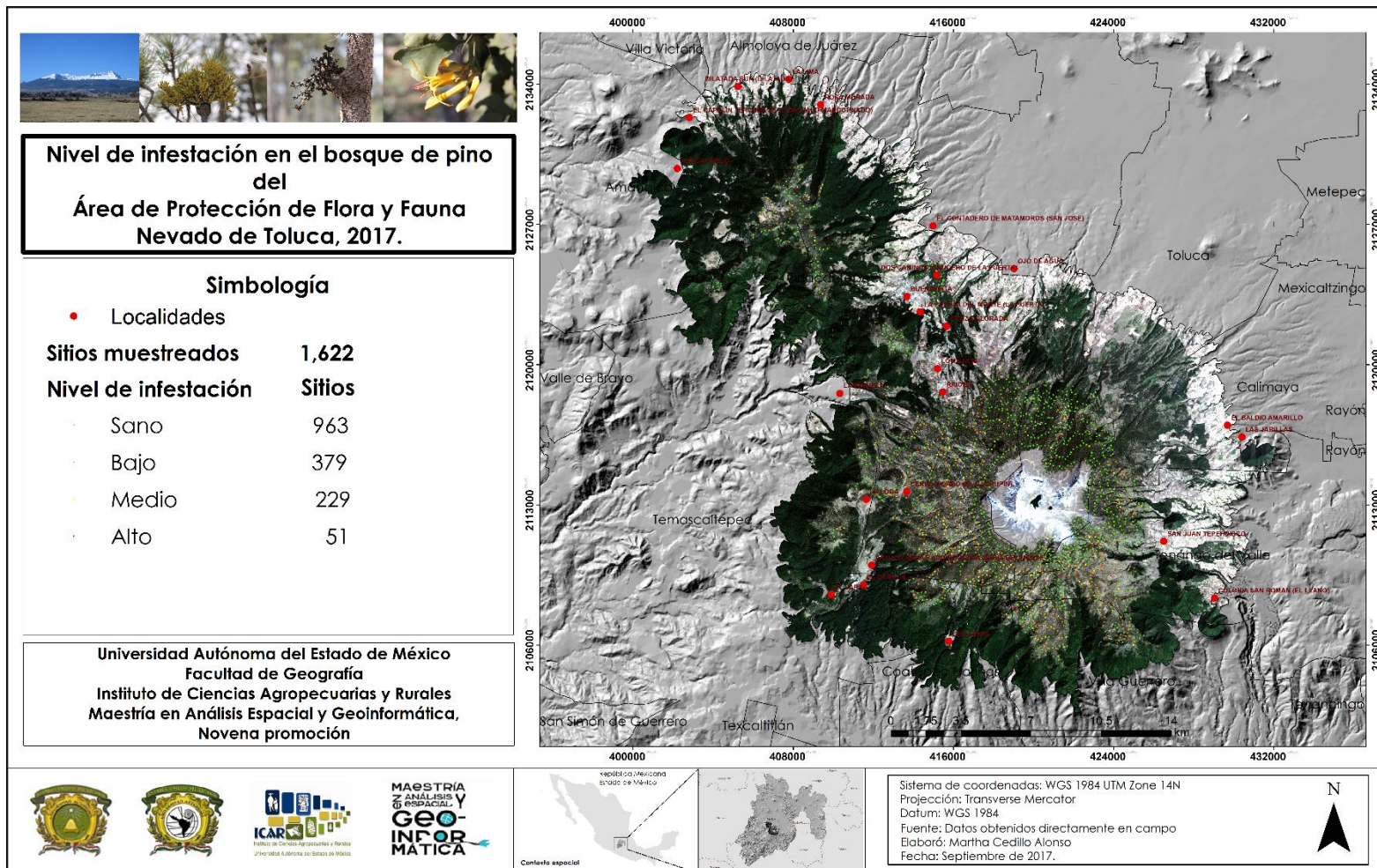
Densidad	Alto				Medio				Bajo							
	Tipo de muérdago %				Tipo de muérdago %				Tipo de muérdago %							
	A	N	AN NA	N V	A	N	AN NA	N V	A	N	AN NA	N V				
AA						1%				99%						
	Porcentaje de infestación															
	0 - 25 %				25 - 50 %				50 – 75 %				75 – 100 %			
	96%				2%				1%				0%			
31 ha	Sin muérdago: 24 ha							Con muérdago: 7 ha								

AA (Árboles aislados), **D** (bosque denso), **S** (bosque semidenso), **F** (bosque fragmentado), **A** (muérdago amarillo), **N** (muérdago negro), **AN** (muérdago amarillo-negro), **NA** (muérdago negro-amarillo), **NV** (muérdago negro-verdadero).

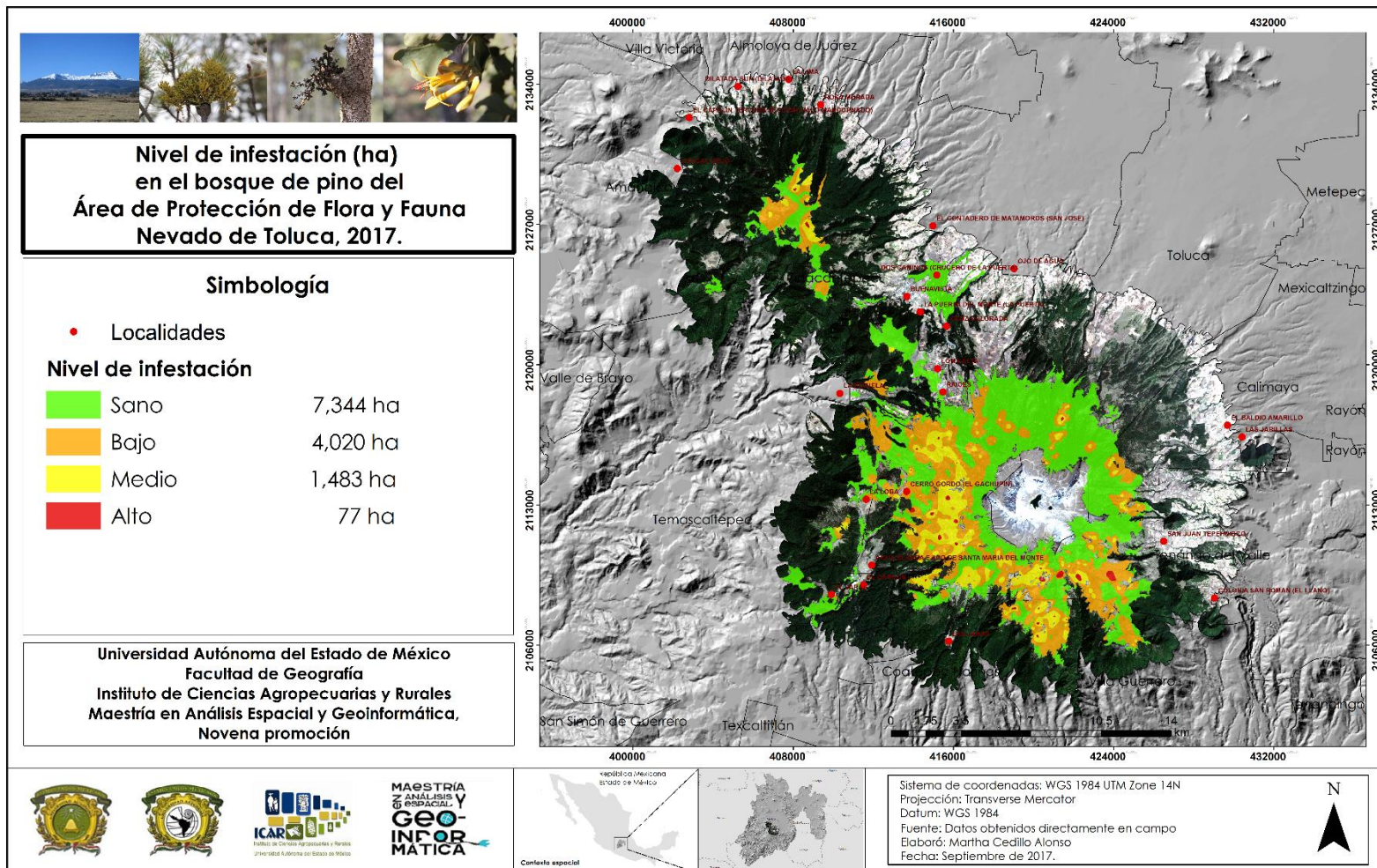
Cuadro 9. Condiciones del bosque de pino por densidad. Elaboración propia.



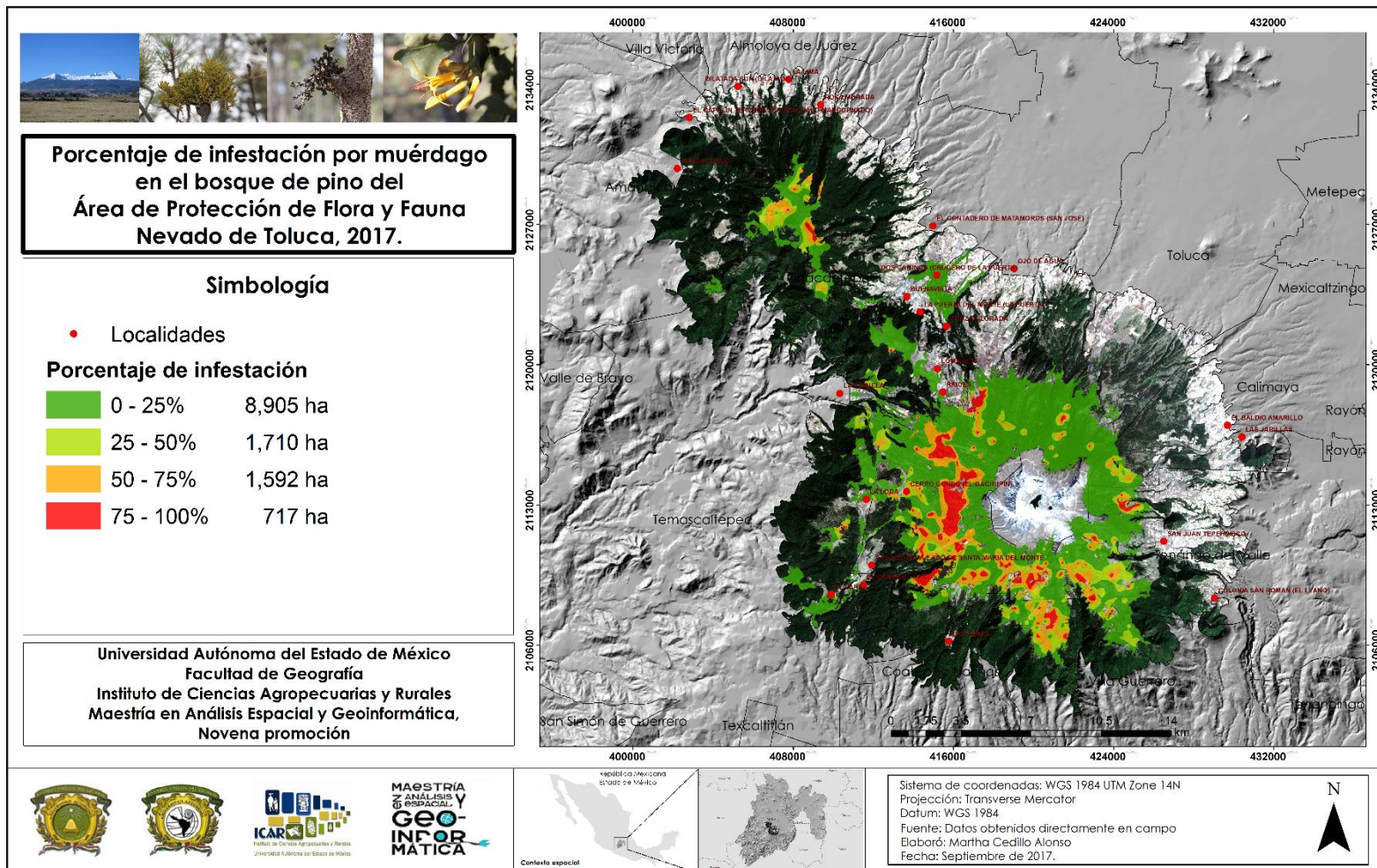
Fotografía 7. Niveles de infestación en el bosque de pino del Nevado de Toluca. Obtenida en campo.



Mapa 14. Nivel de infestación en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.



Mapa 15. Nivel de infestación (ha) en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.



Mapa 16. Porcentaje de infestación en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

4.4 Estructura horizontal del bosque de pino

La estructura horizontal de un bosque natural en zonas predominantemente forestales está determinada además del suelo y el clima, por las estrategias de crecimiento de las especies y los efectos de los disturbios sobre la dinámica del sistema, (Louman, Valerio y Jiménez, 2001).

Hawley y Smith (1972) definieron dos estructuras horizontales principales para los bosques en general: 1) coetáneos o regulares, donde el mayor número de individuos de una o varias especies tienen un tamaño semejante y se concentran en una misma clase de tamaño, 2) discetáneas o irregulares, donde los individuos se distribuyen en varias clases de diámetro o tamaño, y generalmente se representan gráficamente mediante una "J" invertida. Según Louman *et al.* (2001), los bosques secundarios jóvenes corresponden con frecuencia a estructuras coetáneas, mientras que los bosques primarios, así como los secundarios maduros, presentan estructuras discetáneas, aunque en muchos casos de forma incompleta.

Se determinó la estructura horizontal del bosque de pino del Nevado de Toluca (Gráfico 3), la cual toma forma de "J" invertida (estructuras discetáneas), donde las reservas de árboles en las primeras clases aseguran el equilibrio de los bosques (Morales *et al.*, 2012). Éstos incluyen remanentes de bosques naturales no intervenidos, así como bosques secundarios en distintos estadios de sucesión, lo que representa una provisión constante de bienes y servicios ambientales.

En este sentido se expone al Nevado de Toluca como un bosque residual, debido a la intervención antrópica, llevándose los mejores individuos y exponiendo al resto a la infestación por alguna plaga o planta parásita (Gráfico 4 y Fotografía 8), contribuyendo, en gran medida, a la fragmentación constante y continua del bosque. Por esto, resalta la

importancia de implementar acciones silviculturales, para tomar decisiones de conservación y manejo (Morales et al 2012). Cabe mencionar, que un bosque secundario sujeto a plantaciones para la protección, puede llegar a ser un bosque primario, dependiendo del tiempo y de las técnicas de silvicultura que se apliquen (Sabogal et al., 2013).

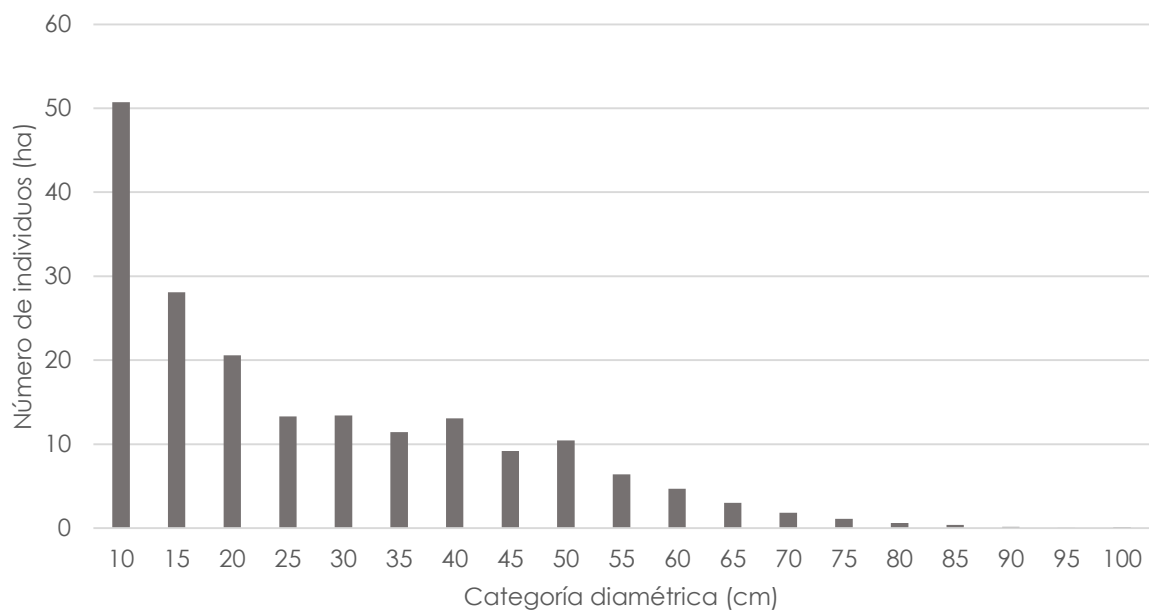


Gráfico 3. Estructura horizontal del bosque de pino del APFFNT. Elaboración propia.

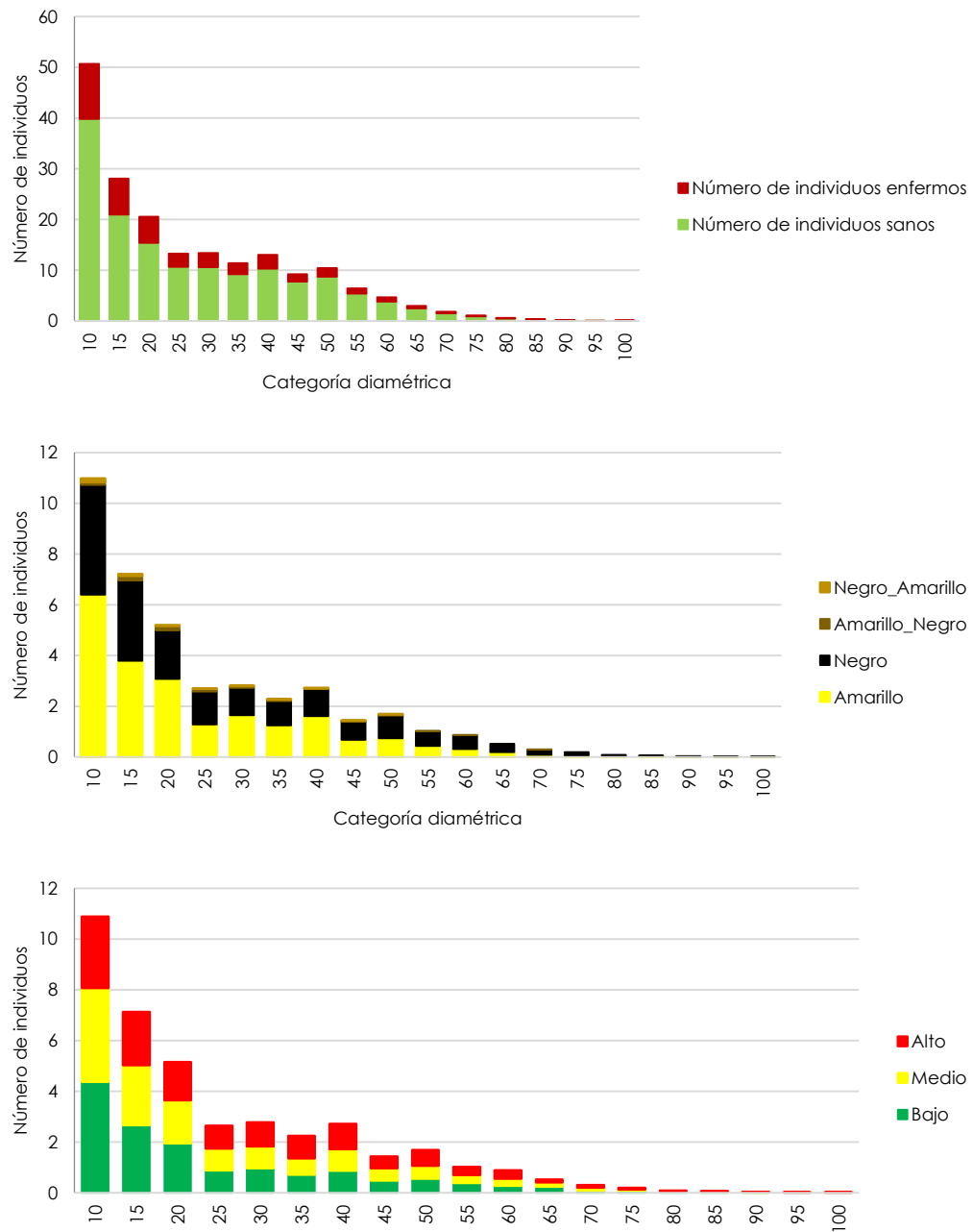


Gráfico 4. Estructura horizontal y sanidad del bosque de pino del APFFNT. Elaboración propia.



Fotografía 8. Tipo de muérdago en el bosque de pino del Nevado de Toluca. Obtenida en campo.

Uno de los desafíos más importantes de la Silvicultura moderna es la regeneración, ya que busca establecer en forma eficiente el reemplazo de los recursos forestales que han sido removidos por causas naturales o por aprovechamiento (Daniel *et al.*, 1982; Smith *et al.*, 1997). Asegurar la regeneración del bosque es prioritario tanto en bosques donde se realiza cosecha o aprovechamiento forestal, como en aquellos que cumplen otras funciones (FAO, 2010).

La regeneración de cualquier especie debe ser considerada como una serie de procesos, cada uno de los cuales puede influir en el resultado final (Harper, 1977). Por tanto, se requiere del cumplimiento sucesivo de las diferentes etapas que constituyen el ciclo, cada una de las cuales puede verse afectada por numerosos factores (bióticos y abióticos) (Pérez, 2007).

Se identificaron 2, 862 ha del bosque de pino con abundancias considerables de regeneración, dónde el 43% presenta algún nivel de infestación (Gráfico 5 y Fotografía 9).

La estructura horizontal de la regeneración en el bosque de pino (Gráfico 6) muestra una baja abundancia de individuos en la categoría de plántula, asociado, posiblemente a la incidencia de incendios y pastoreo. Dicho proceso se debe a diferentes factores, uno de los cuales es la presencia de muérdago y el nivel de infestación que se presenta, originando que la abundancia y condiciones naturales de los fustales se vean alterados considerablemente.

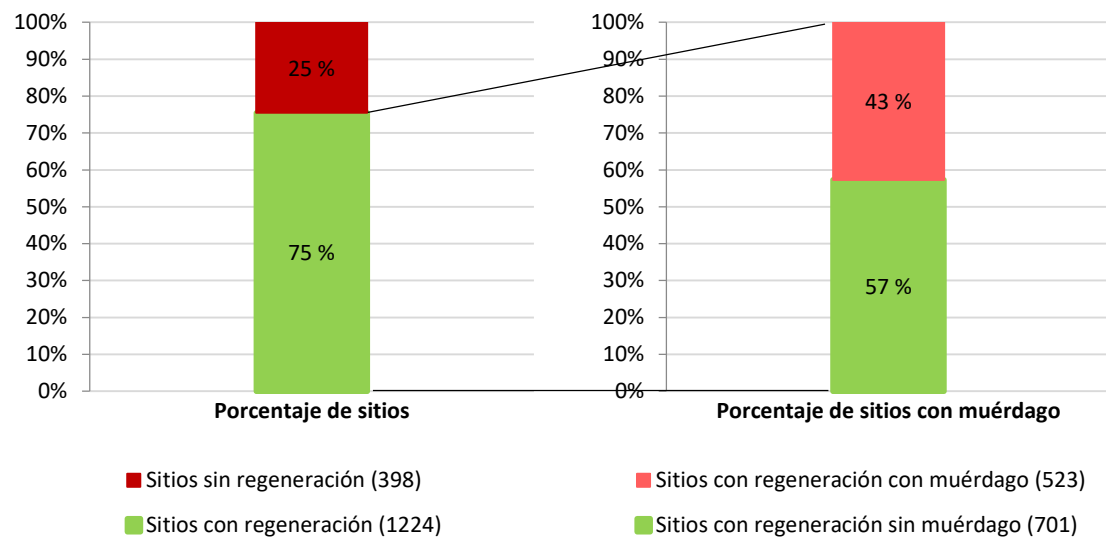


Gráfico 5. Regeneración sana y enferma en el bosque de pino del APFFNT. Elaboración propia.

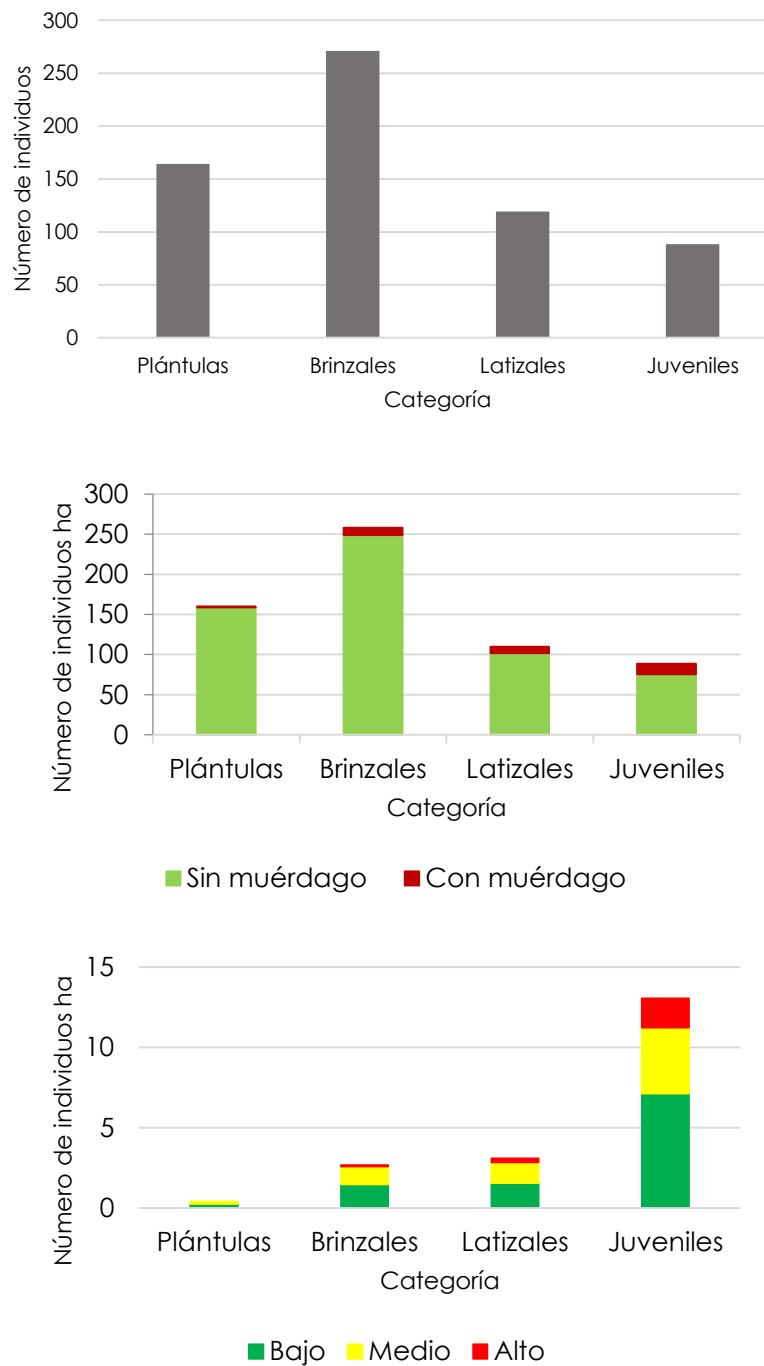
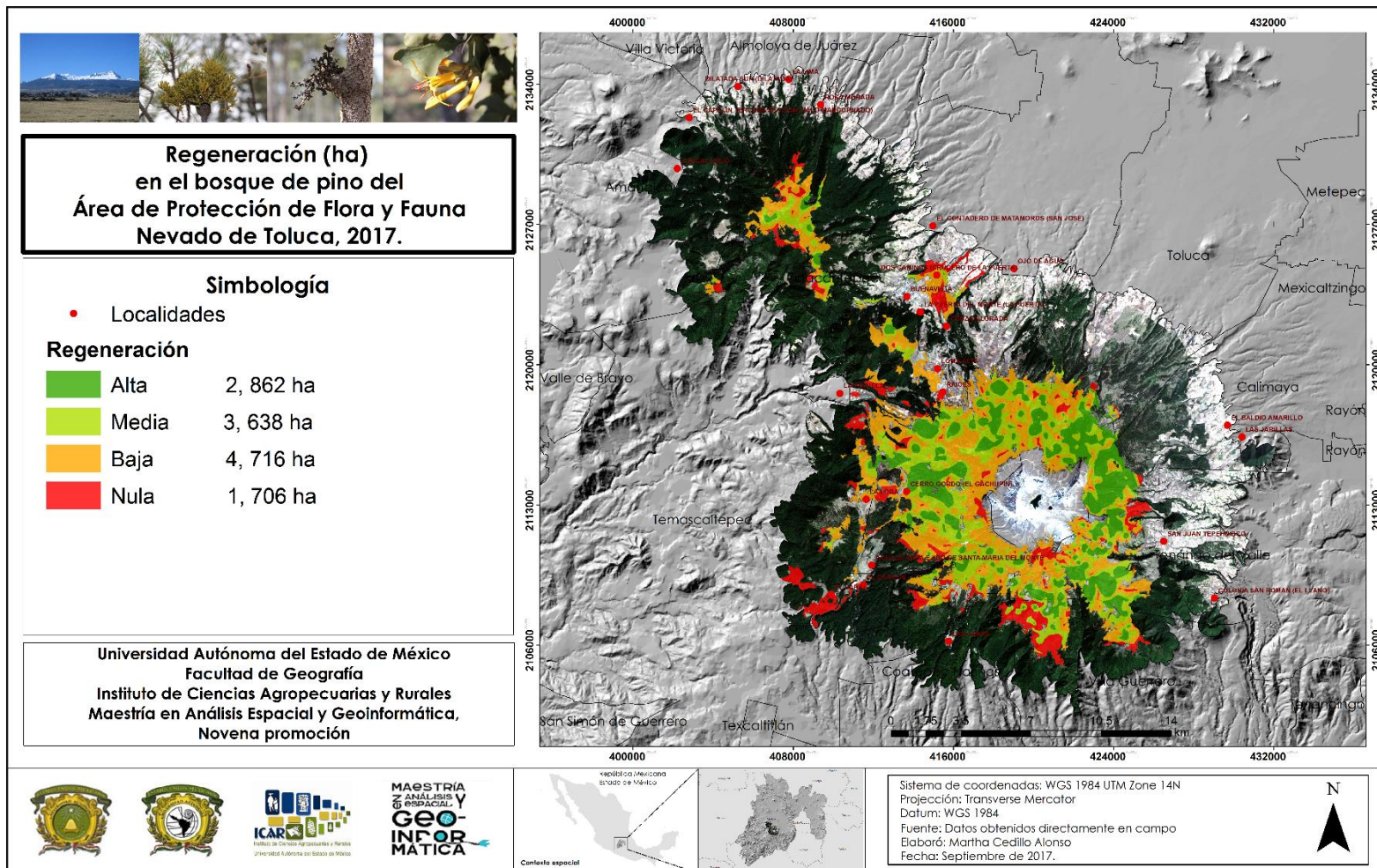


Gráfico 6. Estructura y sanidad de regeneración en el bosque de pino del APFFNT. Elaboración propia.

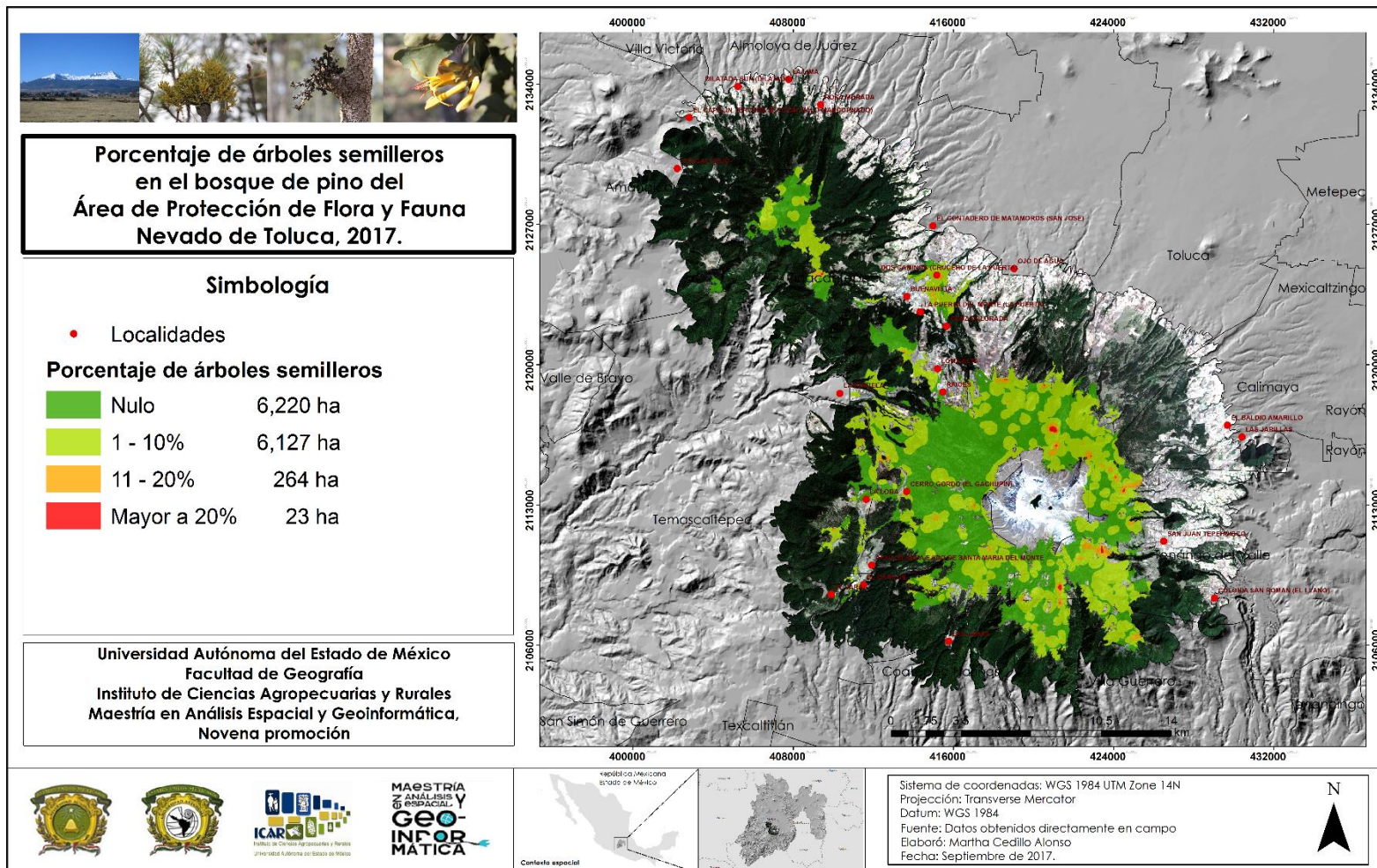
En términos generales los resultados de ésta investigación sugieren una relación directa entre el bosque sano y niveles altos de regeneración (Mapa 17) y, posiblemente serán las zonas potenciales para la obtención de semilla (Mapa 18).



Fotografía 9. Regeneración con muérdago en el APFFNT. Obtenida en campo.



Mapa 17. Regeneración en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.



Mapa 18. Porcentaje de árboles semilleros en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

4.5 Análisis altitudinal con relación al muérdago

El grueso de la masa forestal de pinos mexicanos se desarrolla a altitudes entre 1500 y 3000 msnm. En elevaciones mayores los pinares también son frecuentes y constituyen el único tipo de bosques que alcanza el límite superior de la vegetación arbórea, situado en el norte de México a 3650 msnm. (Beaman y Andresen, 1966). En el centro y sur del país esta línea se ubica aproximadamente a unos 4000 msnm (Miranda, 1947) pudiendo sobrepasar localmente la cota de 4100 msnm.

Con base en el total de sitios evaluados (1,622) se realizó un análisis altitudinal de la distribución de las diferentes especies de muérdago, tomando en cuenta la densidad del bosque (denso, semidenso y fragmentado), nivel de infestación (alto, medio y bajo) y número de árboles muestreados (Figura 16).

El bosque de pino del Nevado de Toluca cuenta con una densidad de 189 árboles por hectárea dominado por el bosque semidenso (49%), lo que sugiere un bosque sujeto a extracción, convirtiéndose en residual. La intervención antrópica es un factor que incide de manera directa en la fragmentación del bosque, extrayendo los individuos con las mejores características, lo que desencadena la propagación del muérdago, así como los mayores niveles de infestación, reflejado principalmente entre las cotas 3400 msnm y 3800 msnm, rango en el que se presenta la mayor problemática con respecto al muérdago.

Cabe señalar que la reforestación es una actividad que se realiza en el Nevado de Toluca principalmente en altitudes bajas, debido al cambio de uso de suelo, es por ello una mayor abundancia de individuos en estas zonas; sin embargo, se debe poner atención en dicha actividad, ya que se encontró un mayor número de individuos infestados, lo que no garantiza la recuperación de la masa forestal.

Con relación a las comunidades más afectadas, se generó una relación de las condiciones del bosque de pino y los Núcleos agrarios (Cuadro 10), en donde se resalta que los municipios más afectados son: Zinacantepec, Tenango del Valle, Almoloya de Juárez y Villa Guerrero, considerando que en algunas de sus comunidades más del 50% de su bosque es pino, del cual en su mayoría (más del 50%) se encuentra con presencia del muérdago.

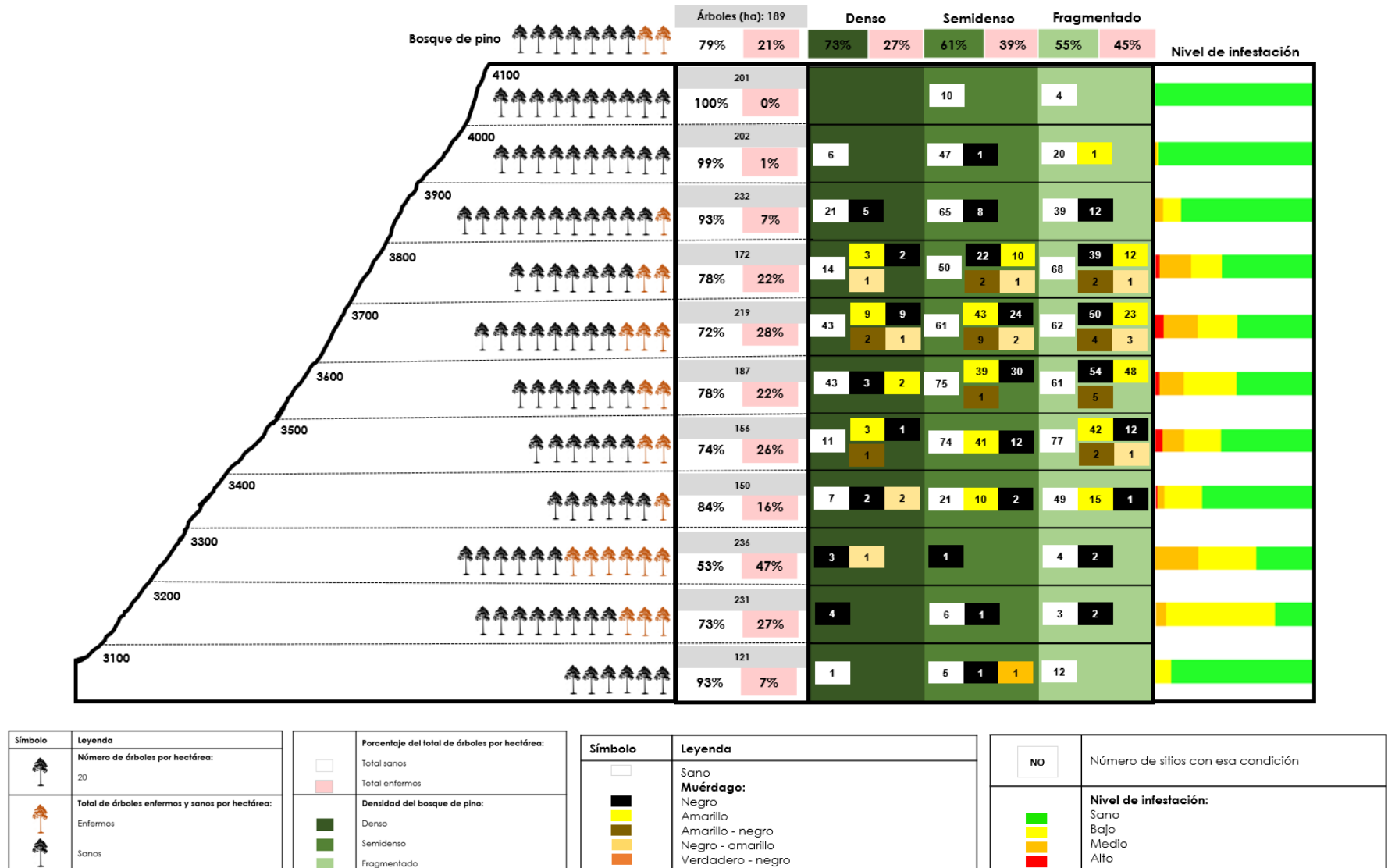


Figura 16. Gradiente altitudinal, análisis fitosanitario. Elaboración propia.

Municipio	Núcleo Agrario	Tipo	Sup. total (ha)	Sup. pino (ha)	Sup. pino (%)	Condición del bosque	Nivel de infestación	Superficie (ha)	%	% Total
Zinacantepec	Buenavista	Ejido	885.57	27.56	3.11	SANO	SANO	27.6	100.00	100
Calimaya	Calimaya	Comunidad	2711.61	214.33	7.90	NEGRO	BAJO	83.2	38.84	45
							MEDIO	13.7	6.37	
						SANO	SANO	117.4	54.79	55
Coatepec harinas	Coatepec harinas	Ejido	2238.99	280.49	12.53	AMARILLO	ALTO	1.1	0.40	40
							BAJO	46.3	16.52	
							MEDIO	59.2	21.12	
						NEGRO	BAJO	4.8	1.70	60
						SANO	SANO	168.9	60.22	
Zinacantepec	El contadero	Ejido	1334.69	1073.55	80.43	AMARILLO	BAJO	176.0	16.40	60
							MEDIO	96.8	9.01	
						AMARILLO_NEGRO	ALTO	0.3	0.03	
							BAJO	4.8	0.44	
							MEDIO	18.2	1.70	
						NEGRO	ALTO	0.6	0.05	
							BAJO	263.4	24.53	
							MEDIO	78.1	7.27	
						NEGRO_AMARILLO	BAJO	3.8	0.35	
							MEDIO	0.0	0.00	
						SANO	SANO	431.6	40.20	40

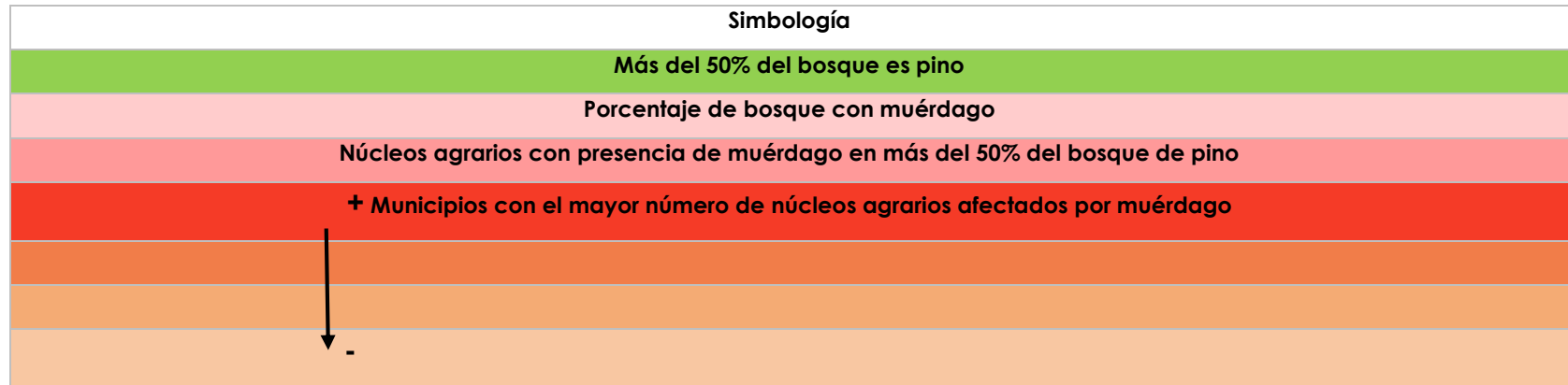
Almoloya de Juárez	El estanco	Ejido	274.07	142.39	51.95	AMARILLO	BAJO	67.8	47.65	55
							MEDIO	9.7	6.80	
						SANO	SANO	64.8	45.48	45
Temascaltepec	El varal	Ejido	165.11	5.48	3.32	NEGRO	BAJO	0.0	0.02	0.1
						SANO	SANO	5.47	99.99	99.9
Temascaltepec	La comunidad	Ejido	769.36	168.31	21.88	AMARILLO	BAJO	35.2	20.93	21
							MEDIO	0.2	0.14	
						SANO	SANO	132.8	78.90	79
Temascaltepec	La estancia	Ejido	538.77	174.22	32.34	NEGRO	BAJO	2.0	1.13	1
						SANO	SANO	172.0	98.74	99
Zinacantepec	La peñuela	Ejido	598.70	168.45	28.14	NEGRO	BAJO	109.6	65.07	68
							MEDIO	1.6	0.96	
						VERDADERO_NEGRO	BAJO	2.6	1.52	32
						SANO	SANO	54.6	32.41	
Zinacantepec	La puerta	Ejido	506.64	189.61	37.43	NEGRO	MEDIO	2.5	1.34	1
						SANO	SANO	187.1	98.66	99
Temascaltepec	Las lagrimas	Ejido	852.41	33.84	3.97	SANO	SANO	33.84	100.00	100
Zinacantepec	Loma alta	Ejido	1493.49	263.51	17.64	AMARILLO	BAJO	4.4	1.68	5
							MEDIO	0.4	0.16	
						NEGRO	BAJO	5.1	1.95	
							MEDIO	4.2	1.60	
						SANO	SANO	249.2	94.57	95

Zinacantepec	Ojo de agua	Ejido	451.08	169.47	37.57	AMARILLO	BAJO	100.7	59.43	62
							MEDIO	4.4	2.60	
						SANO	SANO	64.3	37.94	38
Almoloya de Juárez	Presa de Arroyo zarco	Ejido	1044.18	4.52	0.43	SANO	SANO	4.52	100.00	100
Tenango del valle	Pueblo nuevo	Ejido	918.07	486.84	53.03	AMARILLO	ALTO	5.3	1.09	70
							BAJO	120.8	24.82	
							MEDIO	79.0	16.23	
						AMARILLO_NEGRO	BAJO	1.0	0.20	
							MEDIO	2.9	0.60	
						NEGRO	ALTO	13.3	2.74	
							BAJO	66.7	13.70	
							MEDIO	42.2	8.68	
						NEGRO_AMARILLO	ALTO	3.1	0.63	
							BAJO	0.3	0.07	
							MEDIO	5.4	1.11	
						SANO	SANO	146.5	30.10	30
Almoloya de Juárez	San Agustín Poteje	Ejido	787.30	89.77	11.40	AMARILLO	BAJO	31.9	35.52	74
							MEDIO	34.5	38.49	
						SANO	SANO	23.3	25.99	26
Zinacantepec	San Antonio Acahualco	Ejido	2191.06	367.05	16.75	AMARILLO	ALTO	3.8	1.04	45
							BAJO	112.2	30.57	
							MEDIO	50.5	13.77	
						SANO	SANO	200.5	54.61	55

Temascaltepec	San Antonio de los Albarranes	Ejido	1246.71	80.10	6.42	AMARILLO	BAJO	21.5	26.90	44
							MEDIO	13.4	16.72	
						SANO	SANO	45.1	56.34	66
Amanalco	San Bartolo Amanalco	Ejido	822.30	13.98	1.70	SANO	SANO	13.98	100.00	100
Villa guerrero	San Bartolomé	Comunidad	422.44	82.02	19.42	NEGRO	BAJO	51.7	63.07	66
							MEDIO	2.3	2.81	
						SANO	SANO	28.0	34.08	44
Zinacantepec	San Cristóbal Tecoli	Ejido	999.57	337.56	33.77	SANO	SANO	337.56	100.00	100
Temascaltepec	San Francisco Oxtotilpan	Ejido	1664.71	113.06	6.79	AMARILLO	BAJO	18.7	16.56	17
						SANO	SANO	94.3	83.40	83
Almoloya de Juárez	San francisco Tlalcilalcalpan	Ejido	1150.08	37.69	3.28	AMARILLO	BAJO	16.6	44.13	50
							MEDIO	2.2	5.80	
						SANO	SANO	18.9	50.05	50
Zinacantepec	San juan de las huertas	Ejido	1480.23	773.39	52.25	AMARILLO	ALTO	0.8	0.10	57
							BAJO	81.8	10.57	
							MEDIO	25.2	3.26	
						AMARILLO_NEGRO	BAJO	8.4	1.08	
							MEDIO	5.2	0.67	
						NEGRO	ALTO	1.0	0.13	
							BAJO	237.5	30.71	
							MEDIO	62.6	8.09	
						NEGRO_AMARILLO	BAJO	14.5	1.88	

							MEDIO	1.5	0.19	
						SANO	SANO	335.0	43.31	43
Villa victoria	San Luis	Ejido	220.32	9.51	4.32	AMARILLO	BAJO	1.5	15.34	15
						SANO	SANO	8.0	84.57	85
Villa guerrero	San miguel	Comunidad	93.15	0.56	0.60	SANO	SANO	0.56	100.00	100
Temascaltepec	San miguel Oxtotilpan	Ejido	1025.12	135.51	13.22	NEGRO	BAJO	45.2	33.35	33
						SANO	SANO	90.3	66.61	77
Tenango del valle	San pedro Tlanizco	Ejido	1435.71	249.99	17.41	NEGRO	BAJO	118.9	47.55	51
							MEDIO	8.2	3.29	
						SANO	SANO	122.9	49.15	49
Zinacantepec	Santa María del monte	Ejido	3308.28	1859.27	56.20	AMARILLO	ALTO	15.0	0.81	72
							BAJO	435.2	23.41	
							MEDIO	425.7	22.90	
						AMARILLO_NEGRO	ALTO	2.6	0.14	
							BAJO	27.6	1.48	
							MEDIO	51.2	2.76	
						NEGRO	ALTO	2.2	0.12	
							BAJO	263.8	14.19	
							MEDIO	93.3	5.02	
						NEGRO_AMARILLO	BAJO	10.5	0.56	
							MEDIO	2.4	0.13	
						SANO	SANO	529.6	28.48	28
Villa guerrero		Comunidad	111.10	52.62	47.36	NEGRO	BAJO	13.7	26.04	26

	Santiago Oxtotitlan					SANO	SANO	38.9	73.95	74
Toluca	Santiago Tlacotepec	Comunidad	4752.43	1643.45	34.58	AMARILLO	BAJO	26.6	1.62	11
							MEDIO	5.1	0.31	
						NEGRO	ALTO	2.1	0.13	
							BAJO	120.9	7.36	
							MEDIO	27.4	1.67	
						SANO	SANO	1461.2	88.91	89
Villa guerrero	Zacango	Comunidad	1339.30	607.18	45.34	AMARILLO	ALTO	2.3	0.37	79
							BAJO	247.6	40.78	
							MEDIO	113.2	18.65	
						AMARILLO_NEGRO	MEDIO	3.0	0.49	
						NEGRO	ALTO	0.8	0.13	
							BAJO	104.5	17.22	
							MEDIO	5.8	0.96	
						SANO	SANO	129.9	21.39	21
Tenango del valle	Zaragoza	Ejido	1321.97	832.96	63.01	AMARILLO	BAJO	6.6	0.79	35
							MEDIO	2.3	0.28	
						AMARILLO_NEGRO	BAJO	4.0	0.48	
						NEGRO	BAJO	242.6	29.12	
							MEDIO	27.6	3.31	
						NEGRO_AMARILLO	BAJO	4.2	0.51	
							MEDIO	3.3	0.40	
						SANO	SANO	542.3	65.10	65



Cuadro 10. Núcleos agrarios afectados por muérdago. Elaboración propia.

4.6 Modelo de distribución potencial

4.6.1 Aplicación de correlación de Pearson entre nivel de infestación y variables físico – geográficas mediante SPSS

Se aplicó una primera correlación de Pearson tomando en cuenta las 26 variables que se muestran en el cuadro 11.

Variables seleccionadas	
Clave	Nombres de variables
Altitud	Altitud
Bio1	Temperatura promedio anual
Bio10	Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido
Bio11	Temperatura promedio del cuatrimestre más frío
Bio12	Precipitación anual
Bio13	Precipitación del periodo más lluvioso
Bio14	Precipitación del periodo más seco
Bio15	Estacionalidad de la precipitación
Bio16	Precipitación del cuatrimestre más lluvioso
Bio17	Precipitación del cuatrimestre más seco
Bio18	Precipitación del cuatrimestre más cálido
Bio19	Precipitación del cuatrimestre más frío
Bio4	Estacionalidad de la temperatura
Bio5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido
Bio6	Temperatura mínima promedio del periodo más frío
Bio7	Oscilación anual de la temperatura
Bio8	Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso
Bio9	Temperatura promedio del cuatrimestre más seco
Caminos	Distancia a caminos
Corrientes	Distancia a corrientes de agua
Edafología	Edafología
Erosion	Erosión
Exposi	Exposición de laderas
Localidad	Distancia a localidades
Pendientes	Pendientes
Pino_1	Densidad de pino

Cuadro 11. Variables seleccionadas. Elaboración propia.

Esta primera correlación se realizó con base en la relación de la variable Valor de infestación con las 26 variables seleccionadas, de tal manera que se obtuvo un primer filtro de variables, seleccionando las que tienen menor correlación, pero mayor significancia, obteniendo así 9 variables mismas que se enmarcan en el cuadro 12. Las variables seleccionadas son las que significan más para la presencia del muérdago, es decir, las que influyen más en la presencia de dicha especie.

Correlación de PEARSON de variables con el Valor de Infestación			
Clave	Correlación de Pearson	Significancia (bilateral)	Nombres de variables
Bio16	0.150	0.010	Precipitación del cuatrimestre más lluvioso
Corrientes	0.133	0.023	Distancia a corrientes de agua
Bio12	0.132	0.025	Precipitación anual
Bio13	0.131	0.026	Precipitación del periodo más lluvioso
Altitud	0.121	0.039	Altitud
Bio18	0.110	0.062	Precipitación del cuatrimestre más cálido
Erosion	0.105	0.075	Erosión
Bio17	0.079	0.178	Precipitación del cuatrimestre más seco
Bio19	0.079	0.178	Precipitación del cuatrimestre más frío
Bio14	0.077	0.190	Precipitación del periodo más seco
Edafologia	0.052	0.378	Edafología
Exposi	0.045	0.449	Exposición de laderas
Pino_1	0.040	0.498	Densidad de pino
Caminos	0.013	0.819	Distancia a caminos
Pendientes	0.004	0.944	Pendientes
Bio15	-0.032	0.587	Estacionalidad de la precipitación
Bio6	-0.102	0.082	Temperatura mínima promedio del periodo más frío
Bio11	-0.104	0.076	Temperatura promedio del cuatrimestre más frío
Bio9	-0.104	0.076	Temperatura promedio del cuatrimestre más seco
Bio1	-0.109	0.065	Temperatura promedio anual
Bio5	-0.109	0.064	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido
Bio10	-0.110	0.062	Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido
Bio8	-0.112	0.057	Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso
Bio7	-0.135	0.021	Oscilación anual de la temperatura
Bio4	-0.138	0.019	Estacionalidad de la temperatura
Localidad	-0.158	0.007	Distancia a localidades

Cuadro 12. Variables seleccionadas para correlación con valor de infestación. Elaboración propia.

4.6.2 Aplicación de correlación de Pearson entre las variables seleccionadas mediante SPSS

Una vez obtenidas las variables que significan más para la presencia del muérdago se realizó una segunda correlación con la finalidad de identificar las variables que se correlacionan entre sí y evitar sobreestimar información. El cuadro 13 muestra las 6 variables resultantes para realizar el modelo de potencialidad, las cuáles son: Edafología, Exposición de laderas, Densidad de bosque de pino, Estacionalidad de la precipitación, Distancia a caminos y Pendientes. Las variables Precipitación del periodo más seco, Precipitación del cuatrimestre más seco y Precipitación del cuatrimestre más frío se excluyeron ya que el nivel de correlación con la variable Estacionalidad de la precipitación era muy alto, por lo que se eligió a ésta última debido a la menor correlación con el resto de las variables.

Correlación entre variables significantes para el Nivel de Infestación									
	Bio14	Bio17	Bio19	Edafología	Exposición de laderas	Densidad de pino	Estacionalidad de la precipitación	Distancia a caminos	Pendientes
Precipitación del periodo más seco	1	.949**	.949**	.008	.226**	.090	-.929**	.012	-.135*
Precipitación del cuatrimestre más seco	.949**	1	1.000**	.013	.221**	.097	-.978**	-.034	-.179**
Precipitación del cuatrimestre más frío	.949**	1.000**	1	.013	.221**	.097	-.978**	-.034	-.179**
Edafología	.008	.013	.013	1	.099	.039	-.038	.134*	.084
Exposición de laderas	.226**	.221**	.221**	.099	1	-.012	-.223**	.322**	-.128*
Densidad de pino	.090	.097	.097	.039	-.012	1	-.078	-.027	.032
Estacionalidad de la precipitación	-.929**	-.978**	-.978**	-.038	-.223**	-.078	1	.004	.169**
Distancia a caminos	.012	-.034	-.034	.134*	.322**	-.027	.004	1	-.005
Pendientes	-.135*	-.179**	-.179**	.084	-.128*	.032	.169**	-.005	1

Cuadro 13. Variables seleccionadas para correlación entra variables. Elaboración propia.

4.6.3 Generalidades del modelo de distribución potencial

BIOMOD es una plataforma informática para la predicción por conjuntos de distribución de las especies, lo que permite el tratamiento de una serie de incertidumbres metodológicas en los modelos y el examen de las relaciones especies-ambiente. BIOMOD incluye la capacidad de modelar la distribución de especies con varias técnicas, modelos de prueba con una amplia gama de enfoques, especies de proyectos distribuciones en diferentes condiciones ambientales (por ejemplo, los escenarios climáticos o cambio de uso del suelo) y las funciones de dispersión. Permite evaluar las especies rotación temporal, las especies gráfico de la respuesta curva, y poner a prueba la fuerza de las interacciones entre especies con las variables predictoras (Thuiller *et al.*, 2009).

Se realizó un ensamble de técnicas de modelación debido a su mejor aproximación en los resultados, por medio del software R Studio ya que BIOMOD se implementa en él y es un programa gratuito, de código abierto. Actualmente, BIOMOD permite simulaciones más grandes a través de las condiciones iniciales (es decir, por azar re-muestreo de datos de distribución de las especies y el ajuste de modelos diferentes para cada muestra) (Thuiller *et al.*, 2009).

El cuadro 14 muestra los valores de ajuste de la curva ROC por cada uno de los modelos que integran el ensamble, se observa que el GLM (0.905) y el MAXENT (0.921) tienen un valor por encima de 0.9 lo que nos indica que su ajuste con alta precisión (Thuiller *et al.*, 2009), el SRE tiene un ajuste de 0.692 lo que sugiere un modelo con buena precisión (Thuiller *et al.*, 2009) y para el caso de los modelos GAM Y ANN, como se mencionó anteriormente, no fue posible se integraran al ensamble ya que los datos de entrada superan los admitidos para éstos métodos.

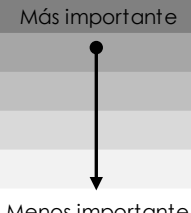
Para validar la calidad del ajuste de los modelos se utilizó el estadístico ROC (Relative Operating Characteristic). Es una medida directa de la capacidad de discriminación del modelo, que toma valores próximos a 1 cuando existe un buen ajuste con los datos, mientras que un valor cercano a 0,5 significa que el ajuste no es mejor que el obtenido por azar (Pando y Giles, 2007). No existen reglas generales para juzgar los valores ROC en los estudios de distribución espacial de plagas forestales, pero algunos consideran que cualquier valor por arriba de 0,7 es considerado aceptable, mientras que valores arriba de 0,8 son excelentes y de 0,9 son excepcionales (Hosmer y Lemeshow, 2000).

Var/modelos	GLM	MAXENT	SRE	GAM	ANN	Ajuste	Valor
Densidad de pino	0.761	0.726	0	NA	NA	Excelente	.97 - 1
Estacionalidad de la precipitación	0.294	0.263	0.4	NA	NA	Muy bueno	.9 - .97
Caminos	0.164	0.155	0.446	NA	NA	Bueno	.75 - .9
Edafología	0.089	0.043	0.163	NA	NA	Regular	.6 - .75
Exposición de laderas	0.023	0.03	0.182	NA	NA	Malo	.5 - .6
Pendiente	0	0.009	0.14	NA	NA		
ROC	0.905	0.921	0.692	NA	NA		

Cuadro 14. Ajuste de los métodos de ensamble del modelo. Elaboración propia.

Por otro lado, se muestran los valores de importancia de las variables que se tomaron en cuenta para generar el ensamble de distribución potencial por método utilizado. Lo que se pretende encontrar en los métodos son el mayor número de coincidencias en cuanto a los valores de importancia de cada una de las variables. El cuadro 15 muestra que las coincidencias en los valores de los métodos GLM y MAXENT son totales, es decir, para ambos la variable que influye en mayor medida para la presencia de muérdago es densidad de pino superando el 70% en ambos casos, seguida de la variable de Estacionalidad de la precipitación con más del 2%, en tercer lugar se encuentra la variable de Distancia a caminos con más del 15%, posteriormente con menor nivel de importancia se encuentran las variables de Edafología, Exposición de laderas y Pendiente. Cabe mencionar que es

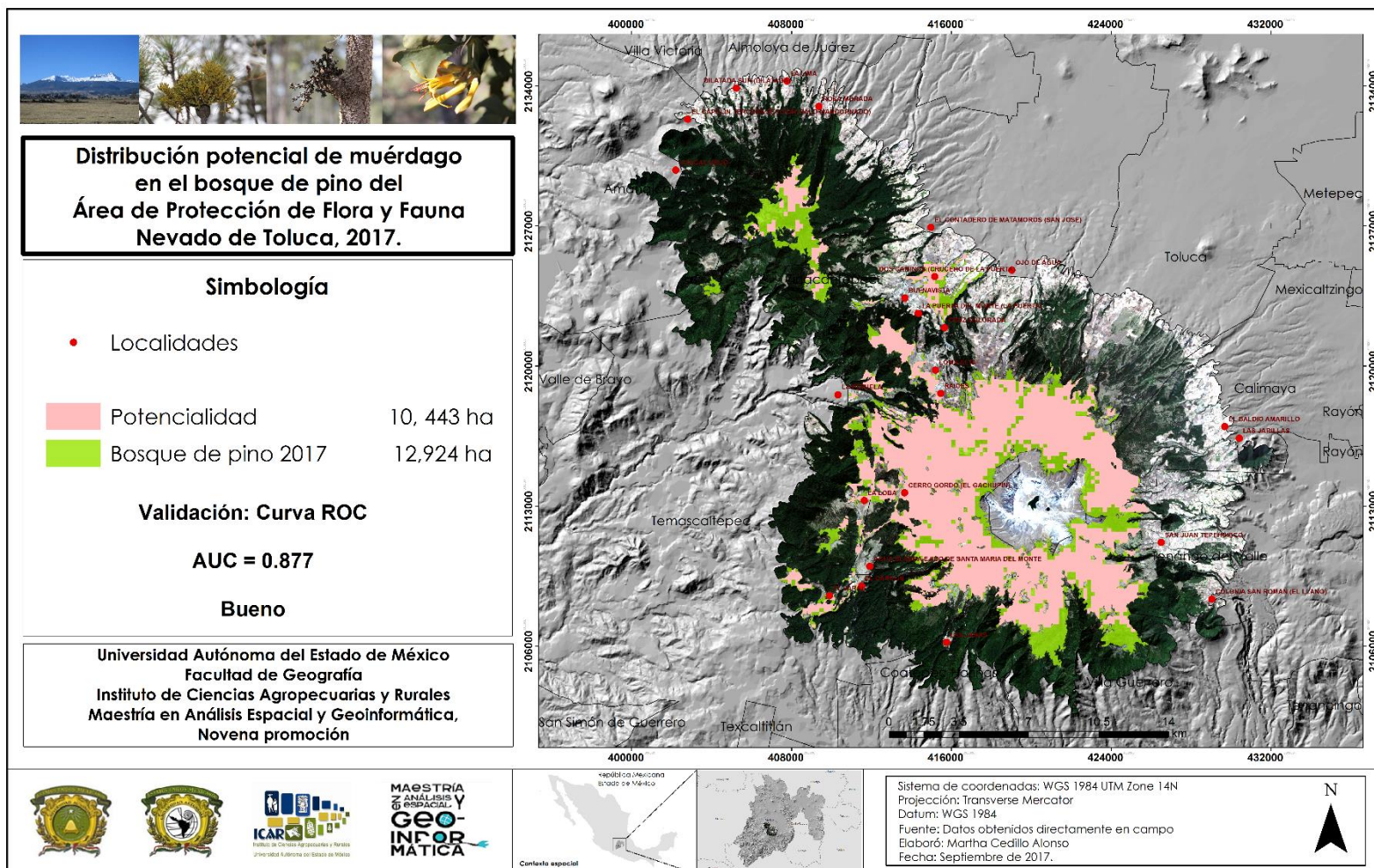
un modelo general debido a la cantidad de puntos muestreados y a la zona de estudio, por lo que es pertinente que se realice un modelo con variables más específicas y con una menor escala que obedezca a las condiciones de desarrollo específicas del muérdago.

Var/modelos	GLM	MAXENT	SRE	GAM	ANN	Nivel de importancia
Densidad de pino	0.761	0.726	0	NA	NA	
Estacionalidad de la precipitación	0.294	0.263	0.4	NA	NA	
Caminos	0.164	0.155	0.446	NA	NA	
Edafología	0.089	0.043	0.163	NA	NA	
Exposición de laderas	0.023	0.03	0.182	NA	NA	
Pendiente	0	0.009	0.14	NA	NA	
ROC	0.905	0.921	0.692	NA	NA	Menos importante

Cuadro 15. Variables según su nivel de importancia. Elaboración propia.

4.6.4 Distribución potencialidad de muérdago en el bosque de pino del APFFNT

Como se mencionó anteriormente se realizó un ensamble de los modelos generados a partir de los métodos GLM, MAXENT y SRE. El mapa 19 muestra la distribución espacial de la potencialidad de muérdago en el bosque de pino del APFFNT. Los resultados señalan que de la superficie total del bosque de pino (12, 924 ha) el 81% corresponde a zonas potenciales para el desarrollo de la especie, es decir 10,443 ha, distribuidas de manera homogénea en el bosque de pino. Por otro lado, el 19% correspondiente a 2, 481 ha resultaron no potenciales. Los resultados indican que una importante superficie de bosque de pino resultó potencial, sin embargo, dichos resultados tienen que ver directamente con el número de puntos de control y la zona de estudio, por lo que es recomendable realizar un modelo que abarque una zona de estudio más grande para un mejor resultado.



Mapa 19. Modelo de distribución potencial de muérdago en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

4.6.5 Validación del modelo mediante la curva ROC

Con base en el 25% de los datos de campo se generó la curva ROC del modelo, con un valor de 0.877, lo que indica que el ajuste del modelo es bueno (Figura17).

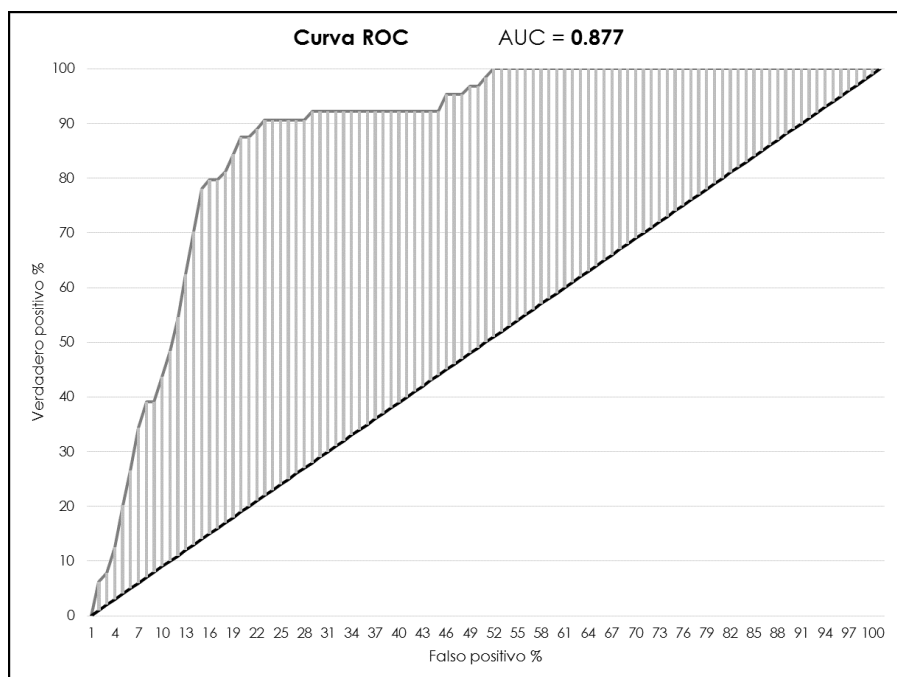


Figura 17. Ajuste del modelo, curva ROC. Elaboración propia.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones generales:

Realizar el análisis espacial de la presencia de muérdago enano en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca tuvo como objetivo principal analizar el grado de infestación con variables geográficas del área de estudio, para lo cual se determinó el estado fitosanitario del bosque, así como la caracterización del Nevado de Toluca. La realización de trabajo de campo y los sistemas de información geográfica fueron indispensables para el desarrollo de ésta investigación.

Con base en los resultados obtenidos se concluye que:

La metodología desarrollada permite la generación de un diagnóstico integral, debido al intenso trabajo de campo y a la utilización de Sistema de Información Geográfica, lo que es fundamental para la conveniente toma de decisiones encaminadas al manejo y conservación de los bosques.

El bosque de pino del nevado de Toluca es un bosque secundario sujeto a extracción selectiva, lo que conlleva a la fragmentación del mismo, generando vulnerabilidad para el ataque de plantas parásitas.

Las laderas más susceptibles a la infestación por muérdago son las nor-oeste, oeste, sur-oeste y sur, convirtiéndose en zonas prioritarias para el desarrollo oportuno de acciones silviculturales encaminados a la protección del bosque sano, así como a la mitigación y control del esparcimiento de la planta parásita.

El muérdago amarillo y negro, respectivamente, son los que ocupa mayor extensión en el territorio infestando, con niveles bajos.

La regeneración del bosque de pino del Nevado de Toluca se presenta mayormente en zonas con arbolado sano, sin embargo, existe presencia muérdago en sus diferentes niveles de infestación, lo que sugiere una relación directa para la reducción de la abundancia significativamente.

El muérdago se desarrolla principalmente entre los 3400 msnm y 3800 msnm, con los más altos niveles de infestación, rango altitudinal en dónde existe mayor fragmentación del bosque.

Los municipios que resultaron ser los más afectados son: Zinacantepec Tenango del Valle, Almoloya de Juárez, y Villa Guerrero, ya que más más del 50% de su superficie corresponde a bosque de pino, el cual se encuentra severamente afectado por muérdago.

Las variables que resultaron con mayor influencia para la presencia del muérdago son: Densidad de pino, Estacionalidad de la precipitación, Distancia a caminos, Edafología, Exposición de laderas y Pendiente.

Contrastando los resultados de ésta investigación con los antecedentes, se concluye que, la selección de un método adecuado en la instalación de sitios de muestreo, la recolección de información y el procesamiento de la misma, son determinantes para un mejor acercamiento a la realidad y por lo tanto, un mejor análisis de la misma, lo que significa un apoyo fundamental en la toma de decisiones encaminadas al manejo y conservación de los recursos naturales.

5.2 Recomendaciones:

Tomando como referencia el análisis de los resultados, es indispensable realizar investigaciones incluidas en esta temática, dirigidas al entendimiento de la dinámica de distribución de plagas y plantas parásitas para el manejo adecuado y conservación de los bosques de alta montaña, es por eso que se presentan una serie de recomendaciones para un mejor análisis:

5.2.1 Académicas:

- Realizar un diagnóstico con base en la información total recolectada a partir de mapas temáticos.
- Realizar un análisis de vulnerabilidad del bosque con base en mapas previamente realizados a partir de la información recolectada en campo.
- Extrapolar la información recolectada por medio de estudios de distribución potencial a cualquier bosque de alta montaña, apoyados de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el propósito de realizar acciones silviculturales para evitar la expansión de la plaga.
- Realizar estudios en sitios específicos con fines de conocer a detalle la fenología del muérdago.
- Difusión de la información dirigida a cualquier tipo de público.
- Replicar este tipo de metodologías en otros bosques.

5.2.2 Prácticas:

- Establecer medidas de prevención, mitigación y saneamiento con base en la cartografía generada tomando en cuenta el tipo de muérdago y nivel de infestación.
- Establecer zonas prioritarias para el adecuado manejo del muérdago.
- Crear programas de monitoreo de muérdago, para controlar su distribución.
- Reforestar con árboles resistentes para evitar la infestación.
- Favorecer la regeneración natural en zonas con presencia de árboles semilleros.
- Implementar programa de manejo para incluir zonas infestadas en el pago por servicios ambientales.
- Implementar los programas de podas en zonas prioritarias, para evitar el esparcimiento de la plaga.
- Realizar estudios sobre usos y aprovechamiento del muérdago y promoverlos con los posibles usuarios.
- Difusión de las investigaciones realizadas, principalmente a la población local.
- Promover la capacidad de auto organización en las comunidades
- Generar alternativas de ingresos comunitarios basados en el potencial natural, social y cultural local.

APORTACIONES

La difusión de las investigaciones realizadas es prioritaria para el beneficio de los agentes directamente involucrados, así como para la difusión de nuevas metodologías con fines de réplicas en diferentes ámbitos académicos, por tal motivo se realizó la presentación de este trabajo en los eventos que a continuación se enlistan:

- Encuentro de Geógrafos de América Latina, EGAL, 2017. La Paz, Bolivia.
- Presentación en Agroecología Universidad de Cochabamba, AGRUCO, 2017. Cochabamba, Bolivia.
- 2do foro de Ganadería sustentable, 2017. Oaxtepec, Morelos.
- Presentación de resultados a diferentes instituciones gubernamentales (CONAFOR, PROBOSQUE y CONANP).
- Presentación con los ejidatarios del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

BIBLIOGRAFÍA

Araújo, M.B. y New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution* 22: 42-47.

Beaman J.H. y Andresen J. W. (1966). "The vegetation, floristic and phytogeography of the summit of Cerro Potosí, México". *The American Midland Naturalist*, 75:1.

Bezaury, C, J. (2004) Las Áreas Protegidas costeras y marinas de México. En: IMAC (2005) Áreas Naturales Protegidas.

Bocco, Eva (1998): Comunicar para la salud. *Revista Latina de Comunicación Social*, 2. Recuperado el 15 de mayo de 2016 de: <http://www.ull.es/publicaciones/latina/z8/i2b.htm>.

BOLFOR; PROMABOSQUE. (1999). Guía para la Instalación y Evaluación de Parcelas Permanentes de Muestreo (PPMs). Santa Cruz, Bolivia.

Buzai, G. D. y Baxendale, C. A. (2006): Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica".

Cárdenas I. D, Castaño A.N, Gutiérrez. C.A, Jaramillo G.I, Jaramillo. L.F, "La madera un combustible milenario de los pueblos amazónicos". En: Colombia, Colombia Amazónica ISSN: 0120-6222 Ed: Editora Guadalupe.

Carpenter, G., A. N. Gillison y J. Winter. (1993). Domain: a flexible modeling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation* 2: 667-680.

Candeau R y Franco S. (2007). Dinámica y condiciones de vida de la población del Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) en la generación de presión a los ecosistemas circundantes y de impactos ambientales a través de un sistema de información geográfica. En *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Núm. 62, p.44-68.

Castañeda R. M. Y López. G. J. L, (2008). Análisis de cambio en la ocupación del suelo en el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) durante el periodo 2000 – 2008. (Tesis de Licenciatura). Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.

CATIE. (1997). Nota técnica sobre manejo de semillas forestales. *Pinus pseudostrobus* Lindl. No. 13. Turrialba, Costa Rica.

Cedillo, A. M (2012). Distribución espacial y análisis de la presencia de plagas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca (Tesis de Licenciatura). Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.

CEPANAF. Parques Naturales del Estado de México, Gobierno del Estado de México. Secretaría de Ecología 48 p. (Fecha de consulta: 25 de mayo de 2016).

CONANP. (1936) Decreto del Parque Nacional Nevado de Toluca. (En línea) Disponible en <http://www.conanp.gob.mx/sig/decretos/parques/Modif-Nevadotoluca.pdf> (Fecha de consulta: 25 de mayo de 2016).

CONANP. (2016). Programa de manejo, Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Visible en: <https://www.gob.mx/conanp/articulos/programa-de-manejo-del-area?idiom=es> (Fecha de consulta: 19 de enero de 2017).

Daniel, P. W., U. E. Helms, F. S. Baker. 1982. Principios de Silvicultura. Editorial McGraw Hill. México. 492 p.

Endara, A. R. (2010). Análisis de los procesos de recuperación en el bosque templado del Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de doctorado. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. 100 p.

Endara, A. A. R., Nava, B. G., Franco, M. S., Espinoza, M. A., Ordóñez, D. J. A. B., Mallén, R. C. (2012). Extracción de madera en el parque nacional Nevado de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3 (11): 81-90.

Endara, A. A. R., Franco, M. S. Nava, B. G., Valdez H. J. I., Fredericksen T.S. (2012) Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forests in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. *Journal of Forestry Research*. 23: 39. <https://doi.org/10.1007/s11676-012-0226-8>.

FAO/UNESCO/ISRIC (1988) Mapa Mundial de Suelos, Leyenda Revisada; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO/UNESCO (2010) Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales, Términos y Definiciones. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Programa de evaluación de los recursos forestales, Roma.

FRA (2015). Documento de trabajo de la Evaluación de los Recursos Forestales. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 2012

Franco, M. S., Regill, H. H. y Ordoñez, J. A. B. (2006) "Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca", *madera y bosques*, 12 (1): p. 17-28.

Franco, M. S., Burrola, A. C. (2009). Los hongos comestibles del parque nacional nevado de Toluca. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR).

Franco, M.S., Endara, A.A.R., Nava, B.E.G. (2010). Estudio fitosanitario forestal del parque nacional nevado de Toluca. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR).

González. G. M. y Ramírez. R. I. (2006). *Ecología métodos de muestreo y análisis de poblaciones y comunidades*.

Graham C, Eggers A, Sukhtankar. S. (2004). Russia, Does happiness pay?: An exploration based on panel data from Russia. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 319-342.

Graham I. D, Logan R.N, Harrison B. M, Straus E. S, Tetroe J, Caswell. W, Robinson N, (2006). Lost in knowledge translation: Time for a map? *Continuing Education in the earth professions*, 13-24.

Guisan A. y Zimmermann N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135:147-186.

Harper, J.L. (1977). *Population biology of plants*. Academic Press, Londres, Inglaterra.

Hawksworth, F. G. (1977). The 6- class dwarf mistletoe rating system. USDA. Gen. Tec. Rep. RM-48. Fort Collins, CO. USA. 6 p.

Hawley, R.C.; Smith, D.M. (1972). *Silvicultura Práctica*. Barcelona, ES, Omega. 544 p.

Hosmer, D. Y Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression*, Second Ed. Wiley- Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

INEGI. (2016) Descargas gratuitas. (2016). Descarga en: <http://www.inegi.org.mx/>.

Leal. N. O, Mendoza. M. E., Pérez. S. D, David. G, López. E.E, y Carranza, E. (2012). Distribución potencial del *Pinus martinezii*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. *Revista mexicana de biodiversidad*, 83(4), 1152-1170. <https://dx.doi.org/10.7550/rmb.27199>.

López, J. M. (2012). *Distribución potencial de especies de la familia*. La paz, Bolivia.

Lori E.D, Margaret S. P. (2003). "Partial AUC Estimation and Regression". *UW Biostatistics Working Paper Series*. Working Paper 181. <http://biostats.bepress.com/uwbiostat/paper181>.

Louman, B; Quirós, D; Nilsson, M. (2001). Silvicultura de bosques latifoliados tropicales con énfasis en América Central. Turrialba, CR, CATIE. 265 p.

Marmion, M, Parviainen. M, Luoto. M, Heikkinen. R.k y Thuiller. W. (2008). Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modeling. *Diversity and Distributions*, v.15, n.1, p.59-69.

Mateo, R. G, Felicísimo. A. M, y Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84(2), 217-240. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>.

Mayer, H, Ott, E, (1991). *Gebirgswaldbau, Schutzwaldpflege*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. Ein waldbaulicher Beitrag zur Landschaftsoökologie und zum Umweltschutz, New York.

Merow C, J. Smith. M, Thomas C. Edwards Jr, Antoine Guisan, Sean M. McMahon. (2014). What do we gain from simplicity versus complexity in species. *Ecography*, 1267.

Morales S. M.S, Vílchez. A.B, Chazdon R.L, Ortega G.M, Ortiz M. E, Guevara B.M. (2012). Diversidad y estructura horizontal en los bosques tropicales del Corredor Biológico de Osa, Costa Rica, Costa Rica, Edición Cartajo.

Mostacedo, B, y Fredericksen, T. S. (2000). Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR).

Nix, H. A. (1986). A biogeographic analysis of the Australian elapid snakes. In: R. Longmore (ed.) *Atlas of elapid snakes*. Australian Flora and Fauna Series No. 7, pp. 4-15.

Ordóñez, C, Martínez. A, (2003) *Sistemas de Información Geográfica: Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales*. Alfaomega-Ra-Ma. España. 224 p.

Palma, O.S y Delgadillo, R. J. (2014). Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*, 92(4), 587-597. Recuperado en 16 de octubre de 2017, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982014000400010&lng=es&tlng=es.

Pando, B. B. (2009). *Ecoinformatica Aplicada a conservación: simulación de efectos del cambio global en la distribución de la flora de Andalucía*. (Tesis Doctoral) Universidad de la Granada España.

Pérez R. I. M. (2007). Factores que condicionan la regeneración natural de especies leñosas en un bosque mediterráneo del sur de la Península Ibérica. Tesis Doctoral Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla. Realizada en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla.

Phillips S.J., Anderson R.P. y Schapire R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.

PRONATURA, (2003). *Conservación Privada en Latinoamérica: Herramientas Legales y Modelos para el Éxito*, México. (En línea) Disponible en http://www.pronatura.org.mx/tierras_publicaciones.php. (Accesado 15 de enero de 2011).

Pliscoff, P y Fuentes. C. T; (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, Sin mes, 61-79.

Sabogal, C; Guariguata, MR; Broadhead, J; Lescuyer, G; Savilaakso, S; Essoungou, N; Sist, P. (2013). Manejo forestal de uso múltiple en el trópico húmedo; oportunidades y desafíos para el manejo forestal sostenible. FAO Forestry Paper No. 173. Roma, Italia, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura / Bogor, Indonesia, Centro Internacional de Investigación Forestal.

Stockwell, D.R.B, (1999) Genetic algorithms II. In: Machine Learning Methods for Ecological Applications. A.H. Fielding, ed. Kluwer Academic Publishers, Boston, 123–144.

Ramírez D. J. F, Porcayo C. E. (2010) Estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium sp.*) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México Bosque, [Fecha de consulta: 1 de junio de 2017]. Disponible en:<<http://oai.redalyc.org/articulo.oa?id=173113300004>> ISSN 0304-8799.

Regil, H. H. (2009). Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación para la obtención de la dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca 1972-2000. Toluca: Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.

Regil G, H. H. (2013). Pérdida y recuperación de carbono derivadas de la dinámica de cambio de uso de suelo en el Parque Nacional Nevado de Toluca, en el periodo 2000-2009 (tesis de doctorado). México: Universidad Autónoma del Estado de México.

Restrepo B, L. F; González. L. J; (2007). De Pearson a Spearman. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, Abril-Junio, 183-192.

Richardson, D. M. y Whittaker, R. J. (2010.) Conservation biogeography-foundations, concepts and challenges. Diversity and Distributions, 2010, vol. 16, N° 3, p. 313-320.

Saunders D. A, Hobbs R. J. y Margules CH. R. Biological (1991) Consequences of Ecosystem Fragmentation. Conservation Biology, Vol. 5, No.1, 18-32. Disponible en: <http://people.cst.cmich.edu/gehr11tm/BIO%20691%20-%20Landscape%20Ecology/Readings/Saunders%20et%20al%201991.pdf>. Fecha de consulta: Abril de 2017,

Sibson, R. (1981) "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation", capítulo 2 de *Interpolating Multivariate Data*, 21–36. John Wiley & Sons: Nueva York.

Thomas, J.B. (1966). Some Scolytidae from the Sierra Madre Occidental in Mexico. *Can. Entomol.* 98 (8). p. 871-875.

Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB, Sykes MT, Prentice IC. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 102:8245–8250.

Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araújo MB. (2009). BIOMOD – A platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*: 32:369–373.

USGS. Modelo digital de elevación ASTER (2016). Descarga en: <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>.

Vitousek P. M, Mooney H. A, Lubchenco J. y Melillo J. M. (1977) Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, New Series, Vol. 277, No. 5325. pp. 494-499. Disponible en:
URL:<http://webpace.pugetsound.edu/facultypages/kburnett/readings/vitousek.pdf>.

Watson. D. (1992). *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*. Pergamon Press: Londres.

Wisz, M.S, Hijmans R.J, Li J, Peterson A. T, Graham C. H, Guisan A y NCEAS Predicting Species Distributions Working Group (2008) Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, (Diversity Distrib.) 14, 763–773.

WorldClim. Variables bioclimáticas. (2016). Descarga en: <http://www.worldclim.org/>.